SCIENCES ET AVENIR

LA BATTERIE SOLIDE

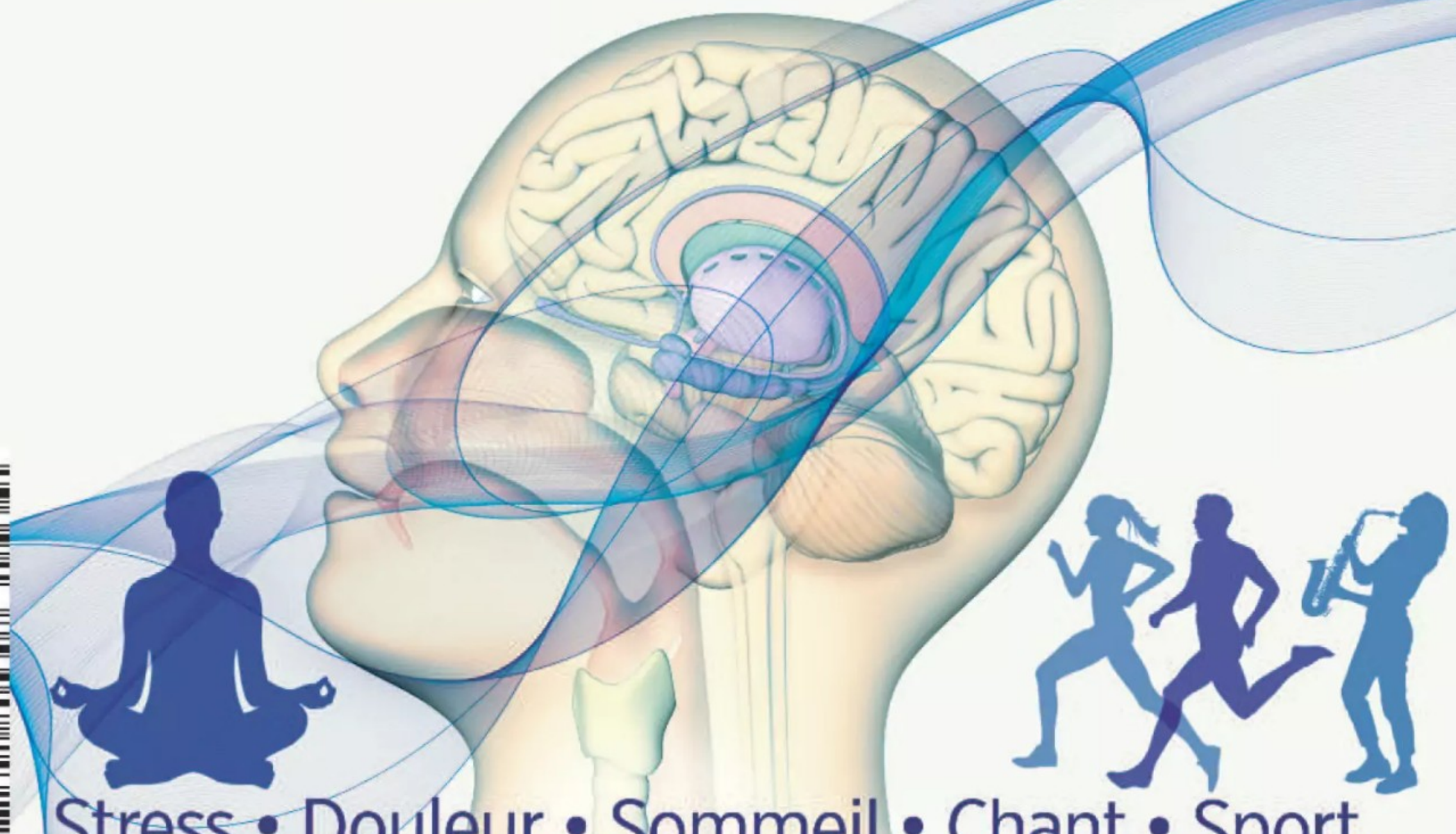
Elle va sauver la voiture électrique

p.32

Les pouvoirs de la RESPIRATION

p.54

Corps et esprit



Stress • Douleur • Sommeil • Chant • Sport...

SCIENCES ET AVENIR - N° 936 - FÉVRIER 2025 - LES POUVOIRS DE LA RESPIRATION
FÉVRIER 2025 - N° 936 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $
L 13418 - 936 - F: 5,30 € - RD
© SHUTTERSTOCK - BRUNO BOURGEOIS POUR SCIENES ET AVENIR

A 0 g CO_2/km
B
C
D
E
F
G
100% ÉLECTRIQUE, 5 PLACES
Consommation d'énergie électrique : 14,0 - 16,4 kWh/100km. Autonomie en cycle mixte : 299 – 405 km ; sur la base de la procédure d'essai harmonisée pour les véhicules légers (WLTP), procédure d'essai
PENSEZ À COVOITURER. #SEDÉPLACERMOINSPOLLUER

NOUVEAU MINI ACEMAN.
CHARGEZ-LE AVEC TOUS CEUX QUE VOUS AIMEZ.

T CHARGÉ EN TECHNOLOGIES DE SÉRIE.

onomie en ville : 384 – 514 km. Emissions de CO_2 (WLTP combiné) : 0g/km. Depuis le 01/09/2018, les véhicules légers neufs sont réceptionnés en Europe mettant de mesurer la consommation de carburant et les émissions de CO_2, plus réaliste que la procédure NEDC précédemment utilisée.

Un glacier ?
Ou un million d'années d'histoire ?

Laissez-vous émerveiller par le Groenland et plongez au cœur de l'histoire de notre planète. Accompagné de nos experts à bord, percez les secrets de sa géologie et revenez avec une compréhension approfondie des enjeux environnementaux qui façonnent notre avenir.

Changez votre regard sur le monde.

À partir de
7 791€ TTC/pers.

Jusqu'à **-15%**
sur nos expéditions en tout inclus au
Groenland
+ la garantie du meilleur prix HX*

Réservations au **01 86 26 04 19**, sur **travelhx.com/fr** ou dans votre agence de voyages

HX

ANTARCTIQUE | ALASKA | GALÁPAGOS | GROENLAND | ISLANDE | SPITZBERG

*Offre soumise à conditions, sous réserve de disponibilités, non rétroactive, valable sur les croisières d'expéditions HX, pour des départs d'avril 2025 à mars 2027, pour toute nouvelle réservation faite jusqu'au 31.03.2025. Le montant de la remise varie en fonction de la destination, de l'itinéraire, du navire et de la date de départ. Le tarif de 7 791 € correspond au départ du 31/05/2025 de la croisière : Expédition au sud du Groenland - sur les traces d'Erik le Rouge. La garantie du meilleur prix HX : si le prix du voyage, à l'identique, baisse après la réservation, nous ajusterons le solde du voyage. Offre cumulable uniquement avec la remise HX Explorers. HX FR SAS au capital de 7.500 EUROS - R.C.S PARIS 931 161 186 - IM Atout France : IM075240035 - APST et L.E.V - Responsabilité civile professionnelle par HISCOX - police n° RCAPST/125 520. ©Jason Charles Hill/ Visit Greenland

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Un souffle nouveau

La vie hors du ventre de la mère commence par un cri. Les poumons se remplissent d'air, la respiration démarre, on peut couper le cordon ombilical par lequel l'oxygène arrivait au fœtus. Puis la respiration se fait oublier, hormis en des circonstances particulières telles qu'un essoufflement excessif. Mais aujourd'hui, c'est un autre cri qui se fait entendre : « *Les techniques respiratoires sont une porte ouverte vers la régulation des fonctions vitales, vers la régulation émotionnelle et cognitive. On devrait absolument l'apprendre à l'école !* », nous dit Sophie Lavault, psychothérapeute et docteure en neurosciences *(p. 63)*. Le travail sur le souffle existe pourtant depuis des millénaires, notamment au travers de pratiques telles que le yoga. Mais ce n'est que récemment qu'il a été considéré de manière scientifique. Désormais, les bénéfices sont avérés pour la santé mentale, la douleur, le stress, la pratique sportive, etc. Ce n'est pas pour rien que, contrairement au rythme des battements de cœur, nous pouvons prendre contrôle de celui de la respiration ! Notre dossier va encore au-delà : « *Dans dix ans, les maladies respiratoires seront sans doute la première cause de décès* », avertit Paul Hofman, directeur de l'institut hospitalo-universitaire Respirera à Nice *(p. 64)*. Bien respirer est aussi un enjeu de santé publique. À l'occasion des trois ans de l'invasion russe en Ukraine, nous vous proposons également un reportage exceptionnel sur la ligne de front. Il nous révèle comment ce conflit est un hybride entre une guerre de tranchées rappelant la Première Guerre mondiale et une guerre technologique d'un nouveau genre avec, côté ukrainien, des outils informatiques sur mesure. Ou comment des maisons qui semblent abandonnées cachent des solutions technologiques inédites permettant d'assister chaque mouvement et chaque tir. Bonne lecture entre le souffle qui guérit et celui des batailles modernes.■

Les bénéfices du travail sur le souffle sont avérés pour la santé mentale, la douleur, le stress, la pratique sportive, etc.

LE SITE WEB DE SCIENCES ET AVENIR DISTINGUÉ POUR SA FIABILITÉ

La société NewsGuard, dédiée à l'analyse de la fiabilité des sites d'informations, a mis à jour son analyse du site web de *Sciences et Avenir* et lui a conservé son score de confiance de 100/100. La fiche d'évaluation indique qu'il satisfait les neuf critères de crédibilité et de transparence. **Retrouvez-nous sur www.sciencesetavenir.fr**

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28 Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, C. COUMAU, J. DE COUCY, V. GLAVIEUX, N. GUTIERREZ C., G. JACQUEMONT, C. JOURDAN, P. KALDY, L. MAROLLÉ, M. PARRA, A. REZGUI, N. SCHEIDHAUER, E. TISSANDIÉ, A. VERNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », les encarts « Sophia Boutique - Montre Laura - double bracelet et Coffret Loupe La Compagnie des Wagons Lits » ainsi que le message « Challenges » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi que le message « Linvosges » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés..
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Révélations sur les mystères de la Voie lactée
(Sciences et Avenir n° 934, décembre 2024)

Dans votre dossier consacré à la Voie lactée, l'article « Quelle est la masse de la Voie lactée ? » est intéressant mais troublant lorsque l'astrophysicien François Hammer écrit : *« La Voie lactée est remarquable car elle n'a plus connu de collisions-fusions avec une autre galaxie depuis 10 milliards d'années. »* Or la Voie lactée a subi trois collisions-fusions successives « récentes », et c'était avec la galaxie naine Sagittarius : une première il y a 6 milliards d'années, suivie de deux autres de plus faible ampleur.

Philippe Tatry

François Hammer : Oui, il aurait mieux valu écrire « collisions-fusions majeures », qui transforment complètement les galaxies qui ont fusionné, et qui avaient un rapport de masse d'un tiers ou d'un quart. Car la collision avec Sagittarius est évidemment bien moindre, et n'a laissé que des traces sur quelques régions du disque, dont particulièrement notre environnement. Si l'on devait comparer avec un accident de la route, imaginez l'impact d'un accident entre une camionnette et une voiture, et comparez-le avec celui d'une voiture et d'un objet de quelques centaines de grammes !

Sagittarius A*

Dans l'article : « Que se passe-t-il près de Sagittarius A* ? » (n° 934), vous écrivez que la Voie lactée abrite un trou noir à 27 000 années-lumière de nous. Plus loin dans l'article, vous écrivez que ce trou noir est sorti d'une période de dormance il y a environ 200 ans ! À 27 000 années-lumière, vous parlez d'un événement qui a eu lieu il y a 200 ans ? Il semble y avoir une incohérence !

R. Bouffard

S. et A. : Quand un trou noir n'absorbe pas de matière environnante, il est inactif. C'est le cas actuellement du trou noir central de la Voie lactée. Pourtant, des observations ont révélé un excès de rayons X émis par des nuages moléculaires situés dans son voisinage. Cet excès ne peut pas être entièrement expliqué par les processus internes des nuages eux-mêmes. À l'aide du satellite IXPE de la Nasa, les chercheurs ont analysé la polarisation de ces nuages de gaz afin de mieux comprendre la provenance de ces émissions. Ils ont ainsi mis en évidence qu'il s'agit là de la trace d'un puissant flash lumineux émis par Sagittarius A* alors qu'il absorbait de la matière. Les estimations basées sur la distance des nuages moléculaires et le temps de voyage des rayons X indiquent que l'événement aurait bien eu lieu il y a environ 200 ans.

Précision

Dans la page du ciel de décembre (n° 934), nous avons proposé à nos lecteurs de tenter l'observation de Mercure 30 minutes avant le lever du Soleil. Comme nous l'a fait remarquer un abonné attentif, le ciel était déjà trop lumineux en cet instant pour que la planète soit visible. En revanche, elle l'était encore jusqu'à 45 minutes avant le lever du Soleil.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 936 / Février 2025

DOSSIER P. 54

Les super-pouvoirs de la respiration

Maîtriser son souffle permet de soulager nombre de maux comme le stress, la douleur ou l'anxiété. La recherche a de surcroît beaucoup progressé dans le décryptage des mécanismes cérébraux qui commandent les poumons. Explications.

P. 8

La guerre high-tech des Ukrainiens

Si la guerre russo-ukrainienne a des airs de Verdun, elle offre aussi un visage high-tech avec la numérisation croissante du champ de bataille. Reportage dans les QG.

P. 32

Batteries : la révolution à venir du « tout-solide »

Promettant plus d'autonomie et de sécurité, la technologie « tout-solide » reste encore à l'état de prototype. L'industrie cherche la clé pour démocratiser la voiture électrique en plein marasme.

P. 42

Comment éviter les collisions avec les baleines

Les solutions se multiplient pour éviter les accidents avec les cétacés, devenus première cause de mort non naturelle chez ces espèces vulnérables. Tour d'horizon.

5 **Édito** par Mathieu Nowak

6 **Courrier**

ÉVÉNEMENT

8 **La guerre high-tech des Ukrainiens**

28 **Les 10 découvertes de 2024**

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** L'âge des anneaux de Saturne remis en question / Pourquoi Ingenuity s'est écrasé sur Mars

32 **Batteries : la révolution à venir du « tout-solide »**

38 **Les obélisques, des virus d'un genre nouveau**

40 **Journal de l'IA : Quand les algorithmes doivent désapprendre**

NATURE

16 **ACTUALITÉS** Le bulletin météo pour 2100 a été publié / Les espèces invasives menacées à leur tour

42 **Baleines : comment éviter les collisions**

48 **Le surtourisme pisté grâce au GPS des smartphones**

50 **Les tourbières, un rempart contre le carbone**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** Une méthode simple révèle l'âge biologique / Le fructose, agent secret du cancer

70 **La lumière bleue des écrans n'affecte pas le sommeil**

74 **Portrait : l'anthropologue, son balai et la psychiatrie**

76 **Nutrition : Le régime méditerranéen, star des menus**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** On a daté le métissage « Sapiens »-Neandertal / La syphilis nous viendrait d'Amérique

78 **Chine : l'armée de terre cuite n'a pas révélé tous ses secrets**

84 **Les murs d'os des catacombes de Paris se relèvent**

86 **Histoire des sciences : Marie Curie et l'étalon radium**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

93 **Expositions**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel de février**

98 **Jeux**

SHUTTERSTOCK - SOS ARMY - E. TSCHAEN/REA - SYLVAIN CORDIER/ GETTY IMAGES

Dans le QG, un soldat vérifie l'absence de menace aérienne avec le système Virazh, qui collecte de nombreux capteurs (à droite). Dès son feu vert, ses équipiers (à gauche) vont pouvoir ainsi déplacer en sécurité une pièce d'artillerie pour pilonner une tranchée russe.

La guerre high-tech des Ukrainiens

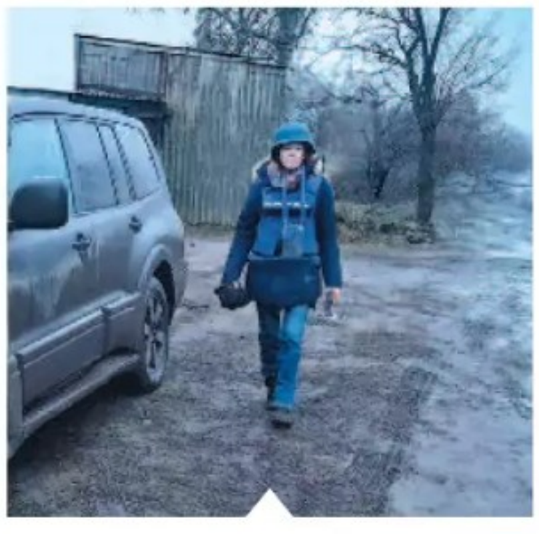
Les terribles affrontements qui opposent depuis trois ans les soldats dans les tranchées donnent à la guerre russo-ukrainienne des airs de Verdun. Mais le conflit offre aussi un visage résolument high-tech avec la numérisation croissante du champ de bataille. Comme on peut le constater en poussant la porte des QG sur la ligne de front.

Texte et photos : Natacha Scheidhauer

◀ **À l'écran,** s'affichent les retours de différents capteurs sur le terrain. Les soldats disposent même de la vision d'un drone ennemi : ils ont piraté sa fréquence et peuvent prévenir les leurs de l'approche de la menace.

◀ **Plus on approche du front,** plus on croise des véhicules équipés de dispositifs antidrones. Sur les camions militaires ou les véhicules civils utilisés par les soldats, sont disposés des brouilleurs électroniques parfois couplés à des cages protégeant mécaniquement des explosions.

Décembre dernier, quelque part dans le Donbass. Nous laissons la voiture sur le bas-côté de ce qui n'est de toute façon pas une route mais un chemin poissé de boue. La faute à la *raspoutitsa*, cette gadoue saisonnière qui englue l'Ukraine deux fois par an, à l'occasion des pluies d'automne puis du dégel printanier. Le soldat de l'armée ukrainienne avec qui nous avons échangé peu avant sur WhatsApp pour obtenir les coordonnées GPS du rendez-vous vient à notre rencontre et nous invite à le suivre jusqu'à la première maison. Pareille à celles qui ponctuent ce hameau déserté par les civils, elle ne paie pas de mine et, si le ronronnement d'un groupe électrogène attire l'attention dès le portail franchi, rien ne présage de ce que l'on découvre derrière la porte : sur les murs grossièrement blanchis à la chaux, entre les fenêtres masquées des regards extérieurs, une dizaine d'écrans de contrôle high-tech occupent l'espace, nous projetant sans transition dans le champ de bataille numérisé. Bienvenue dans la guerre du XXIe siècle.



Dans le Donbass, un hameau abrite un QG avancé.

Aux claviers, des soldats s'activent. Dans la première salle, installé à un bureau que surplombe une icône orthodoxe protectrice, un homme est chargé de surveiller numériquement le ciel au moyen du système Virazh (prononcer « Viraj »). Au-delà d'un radar de défense aérienne classique, ce réseau combine la collecte d'une quarantaine de capteurs différents : infrarouges, flux vidéo des drones, imagerie satellitaire, etc. Dès sa conception, dans le cadre de l'agression russe de 2014, il a notamment innové en utilisant des capteurs acoustiques, déployés dans l'environnement à peu de frais et discrètement sur de simples poteaux électriques, ou bien déjà inclus dans les téléphones portables de volontaires civils. Mis à contribution, ces derniers peuvent enregistrer puis transmettre en temps réel le son des appareils ou projectiles russes en approche.

Le moindre mouvement dans l'espace aérien est identifié

La performance relative de ces capteurs par rapport aux radars spécialement conçus est compensée par leur nombre : il y en aurait des milliers disséminés sur le territoire. Moyennant un traitement par intelligence artificielle, il est ainsi possible d'identifier automatiquement le moindre mouvement dans l'espace aérien de l'Ukraine et de gagner un temps précieux pour choisir la réaction appropriée à la menace entrante.

Dans l'immédiat, notre homme a pour mission de confirmer qu'aucun drone ne survole la zone du front qui s'affiche sous nos yeux. Dans la pièce adjacente, le commandant — 25 ans à peine et déjà deux années passées en captivité en Russie — a en effet décidé de déplacer une pièce d'artillerie qui, sans contrôle aérien, serait une cible facile. Son but ? Frapper les silhouettes désincarnées qui s'animent dans la tranchée à l'écran. Quelques minutes après, c'est chose faite. En deux coups seulement, le char de conception française AMX-10 a atteint sa cible.

Pour réussir cette manœuvre, l'équipe a pu compter sur Kropyva, un autre incontournable de cette guerre numérique. Ce logiciel dont le nom signifie « ortie » s'avère un sacré poil à gratter pour les Russes. Unanimement salué par les soldats sur le terrain, notamment dans une récente enquête du ministère de la Défense ukrainien, il est décrit comme le « Uber » de l'artillerie. De même que ▶

l'application choisit le taxi le plus pertinent pour répondre à votre demande de transport, Kropyva dispose d'un algorithme proposant la meilleure solution pour remplir une tâche militaire, jusqu'au plus bas niveau tactique sur le terrain, celui de la petite unité, voire du combattant individuel — droniste, fantassin, artilleur, etc. Nourri de la localisation des positions amies et ennemies et autres paramètres comme les conditions météorologiques indispensables au réglage des trajectoires des tirs d'artillerie, Kropyva peut par exemple coordonner des pièces séparées de plusieurs kilomètres mais également des drones pour optimiser l'impact d'une frappe sur la cible désignée, en quelques minutes et à 1,5 mètre de précision.

ARMY SOS

Kropyva est développé par les bénévoles de l'association Army-SOS. Ils ont déjà distribué plus de 15 000 tablettes pourvues de ce logiciel de combat.

Des solutions logicielles conçues bénévolement par des civils

Fin logisticien, le logiciel intègre aussi les stocks de munitions des unes et autres positions afin de solliciter les mieux pourvues. Ici encore, l'automatisation des tâches fait gagner de précieuses minutes, du temps de géolocalisation des cibles à celui du déploiement des batteries, diminuant d'autant l'exposition au danger des soldats sur le terrain. Ajoutons à ces fonctions l'échange de données entre utilisateurs par simple SMS, *via* des radios à ondes courtes ou des terminaux satellitaires, et surtout une option cartographique hors ligne pour s'orienter même sans signal Internet : on comprend aisément le succès rencontré par Kropyva dans l'artillerie, mais aussi au sein des unités blindées, d'infanterie ou de reconnaissance.

Virazh, Kropyva, mais aussi Delta : la plateforme de commandement et de contrôle utilisée par l'état-major ukrainien agrège des logiciels et fusionne des données de toutes sortes pour obtenir une image complète de la situation militaire. Si toutes les armées modernes possèdent des systèmes similaires, ces logiciels et applications ont une particularité : il s'agit de solutions électroniques conçues bénévolement par des volontaires civils, souvent dès le début de l'agression russe en 2014, et pour certaines adoptées ensuite officiellement par l'armée. Une signature commune synonyme d'agilité. Accessibles sur des supports électroniques grand public, ordinateurs mais aussi smartphones et tablettes, ces solutions se révèlent peu coûteuses et leur prise en main intuitive dispense de longues séances de formation.

Les programmes s'améliorent par les retours d'expérience

Il en est de même pour les drones faits maison — autre emblème de cette guerre high-tech — que ne cessent de personnaliser des équipes dans des ateliers en tout genre cachés dans les sous-sols du pays. Pragmatiques, ces programmes s'adaptent aussi à la réalité du terrain pour prendre en compte la diversité du matériel utilisé par l'armée ukrainienne : des rustiques canons de 152 mm hérités de l'ère soviétique aux 155 mm de ceux fournis par les nations occidentales qui supportent et approvisionnent l'Ukraine. Surtout, ils font l'objet d'améliorations très fréquentes à partir du retour d'expérience des utilisateurs sur le terrain, qui peuvent faire remonter leurs suggestions en un clic au « service client ». Enfin, ils permettent aussi d'inclure la participation des civils encouragés à résister à leur manière en nourrissant ces applications de toutes sortes de signalements concernant la présence de l'ennemi (menaces aériennes mais aussi mouvements de troupes, entrepôts de munitions, positions d'artillerie, héliports, etc.).

© [FR]

VERBATIM

RÉMY HÉMEZ OFFICIER DE L'ARMÉE DE TERRE, SPÉCIALISTE DES ENGAGEMENTS MILITAIRES CONTEMPORAINS

Guerre technologique : oui, mais…

« Avec des images de la zone de conflit obtenues à distance de sécurité, en temps réel et de façon quasi permanente, la numérisation de l'espace de bataille permise par les avancées technologiques offre une lisibilité sans précédent. Les évolutions améliorent aussi la performance des équipements, en particulier en matière de puissance de feu. Aujourd'hui, pour être capable de faire face à tous les types d'adversaires, une armée ne peut se passer de matériels de plus en plus avancés, mais la technologie militaire ne doit pas submerger le champ de bataille. Parce qu'elle porte en elle de nouvelles failles techniques, comme les cyberattaques, et fait l'objet de contre-mesures permanentes de la part de l'adversaire, mais aussi parce qu'elle pose le risque d'une paresse intellectuelle et morale en réduisant la stratégie à l'emploi de moyens. »

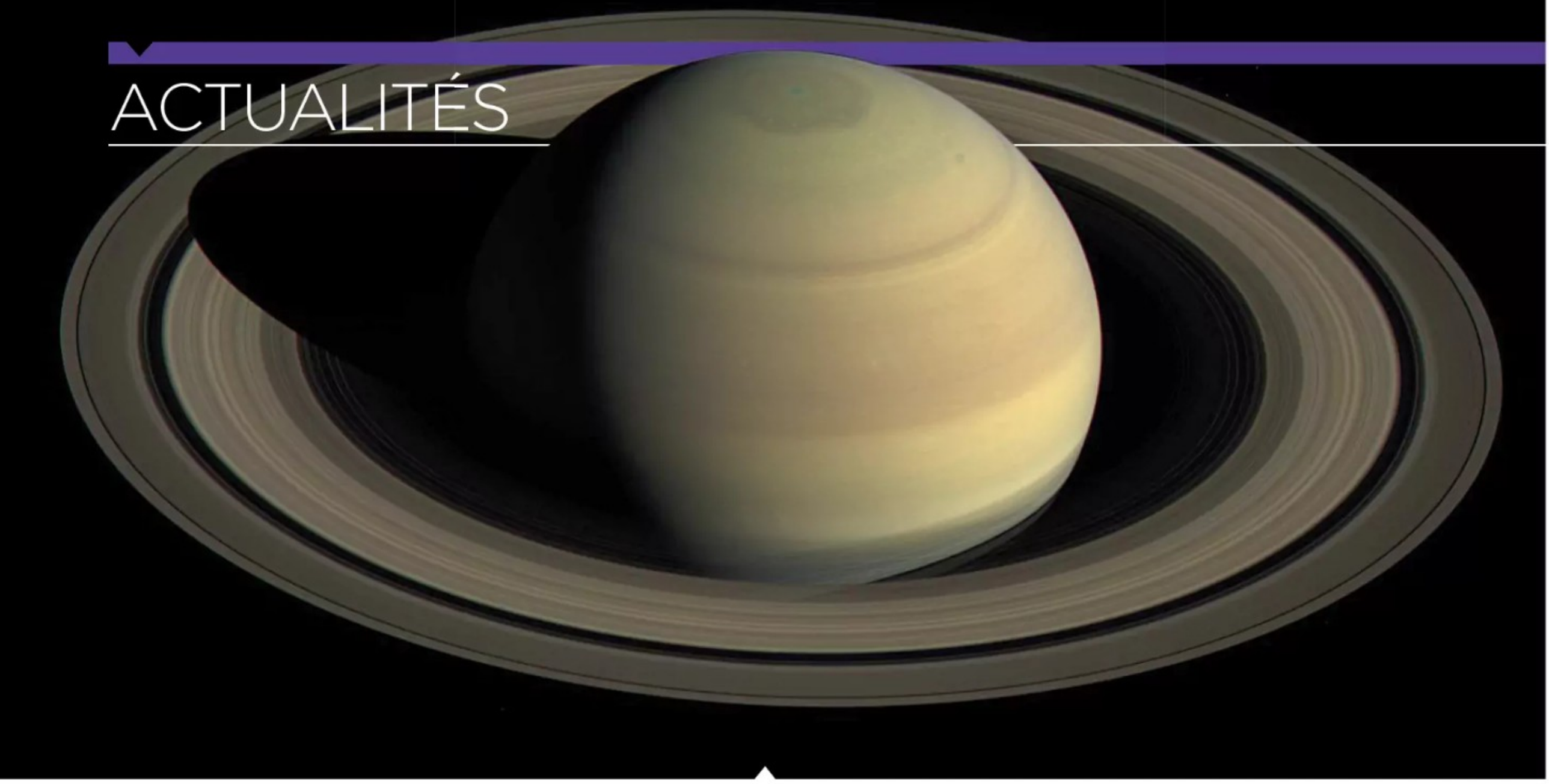
ÉQUIPEMENT

Un poste de soins discret et mobile

En février, Damien Harri-Marin livrera un vingtième StabNet sur le front. Ce poste de stabilisation médicale avancé est né d'une initiative franco-ukrainienne. L'idée ? Projeter la technologie médicale au plus près de la ligne de front. Petite, légère (2 tonnes environ), la structure peut être tractée par un simple véhicule, et un système de double essieu augmente l'angle d'inclinaison, soit 40° adaptés au hors-piste… et au mauvais état notoire des routes de campagne ukrainiennes. « *Cette agilité permet de se rapprocher des victimes pour les prendre en charge au plus vite,* explique le concepteur du projet. *L'objectif est de stabiliser leur état médical dans la première heure après la blessure.* » Une *golden hour* qui s'avère un moment stratégique pour les chances de survie. Pompe à perfusion, concentrateur pour produire de l'oxygène… Dans ce petit conteneur, tout a été pensé pour aider les équipes médicales, notamment dans la prise en charge des hémorragies vitales, première cause de décès dans ce contexte. Et l'équipe est à l'écoute des utilisateurs : « *En lien avec les médecins sur le terrain, nous améliorons régulièrement le matériel. Comme ces réfrigérateurs à compression, capables de fonctionner sur batterie pour conserver sang et plasma en toute circonstance.* »

Léger, mobile, équipé de technologies médicales de pointe, StabNet peut se rendre au plus près de la ligne de front.

Cette horizontalité pose bien quelques problèmes d'uniformisation entre les unités, notamment pour ceux qui utilisent l'une ou l'autre de la dizaine d'applications de combat disponibles — il y a aussi MilChat, GisArta, Terminal, ComBatVision, Ukrop… —, mais ce foisonnement de solutions innovantes participe également à la capacité de l'Ukraine à résister à une armée bien plus grande qu'elle, mais au management trop vertical pour en faire autant. Ainsi, alors que l'armée de Vladimir Poutine ne fait pas significativement évoluer sa culture et ses pratiques, les forces ukrainiennes délaissent — progressivement et non sans mal, mais tout de même — leurs oripeaux d'ex-armée soviétique. En témoigne la jeunesse de l'équipe aux manettes du QG où nous nous trouvons et sa relative autonomie. Pour la plupart natifs du numérique, ces soldats reconnaissent qu'ils auraient du mal à revenir à une guerre déconnectée. Une accoutumance qui pointe une autre des limites de cette guerre « réseau-centrée » : la dépendance à la connectivité, même si des plans B — cartes papier, communications par drones de livraison voire estafettes à l'ancienne, etc. — restent évidemment prévus en cas d'indisponibilité d'Internet. Sans visibilité sur la continuité de la mise à disposition de Starlink, suspendue aux lubies d'Elon Musk, mais aussi pour les combats qui sont menés en territoire russe, comme à Koursk, et où la constellation satellitaire n'est pas accessible, l'Ukraine a d'ailleurs déjà choisi des fournisseurs alternatifs, comme le OneWeb britannique. Dans l'immédiat, les gigaoctets qui animent les murs d'écrans de cette maisonnette sans histoire apparente se révèlent autant de balles pour atteindre l'ennemi. ■



Le flux de micrométéorites s'abattant sur la planète salirait moins les anneaux que prévu, entretenant leur jeunesse apparente.

L'âge des anneaux de Saturne remis en question

Une équipe internationale estime que ces structures pourraient être aussi âgées que la planète elle-même, soit plus de 4 milliards d'années.

Les anneaux de Saturne, qui s'étendent sur des centaines de milliers de kilomètres de diamètre, pourraient être beaucoup plus anciens que ce que les scientifiques ne l'imaginaient. Ces dernières années, plusieurs études estimaient que leur âge devait être compris entre 100 et 400 millions d'années — semblable par conséquent à celui des dinosaures. Mais une équipe de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et de l'université des sciences de Tokyo (Japon) ébranle cette théorie. *« Les résultats que nous avons obtenus indiquent que ces structures ne sont pas nécessairement jeunes et pourraient être aussi âgées que la planète elle-même, soit plus de 4 milliards d'années »*, avance ainsi Gustavo Madeira, chercheur à l'IPGP et coauteur de ces travaux.

L'idée selon laquelle les anneaux de Saturne se seraient formés à une époque relativement récente reposait sur les observations de la sonde américaine Cassini, qui a exploré le système saturnien entre 2004 et 2017. Elle a établi que la planète était bombardée en permanence par des micrométéorites composées principalement de silicates (dioxydes de silicium associé à d'autres oxydes métalliques) filant à plus de 100 000 km/heure. Et qu'en dépit de ce flux incessant de poussières brunes cosmiques, les anneaux étaient constitués à plus de 99 % de glace d'eau. D'où l'hypothèse que *« ces structures seraient apparues il y a seulement quelques centaines de millions d'années »*, précise Gustavo Madeira, puisqu'elles semblent aujourd'hui très peu « polluées » en silicates et possèdent ainsi un fort pouvoir réfléchissant.

Un mécanisme d'« autonettoyage »

Or, en modélisant l'impact des micrométéorites sur les disques de glace, l'équipe franco-japonaise a découvert que le choc engendrait des températures supérieures à 10 000 °C. De quoi vaporiser complètement les micrométéorites. Et créer un gaz qui se condense par la suite en diverses particules électriquement chargées. Celles-ci interagissent alors avec le puissant champ magnétique de Saturne, indiquent les simulations : soit en les attirant vers l'atmosphère planétaire, soit en les expulsant dans l'espace. Au final, *« seul 1 % de la matière météoritique se déposerait sur la glace, contre plus de 10 % selon les précédentes estimations »*, signale Gustavo Madeira. Grâce à ce mécanisme, les anneaux de Saturne pourraient ainsi « s'autonettoyer », conservant en quelque sorte une jeunesse éternelle. Mais leur éclat ne refléterait en aucun cas leur âge véritable. **F. D.**

NASA/JPL-CALTECH/SPACESCIENCE INSTITUTE

Pourquoi Ingenuity s'est écrasé sur Mars

Le système de navigation du petit hélicoptère aurait mal évalué la nature du sol.

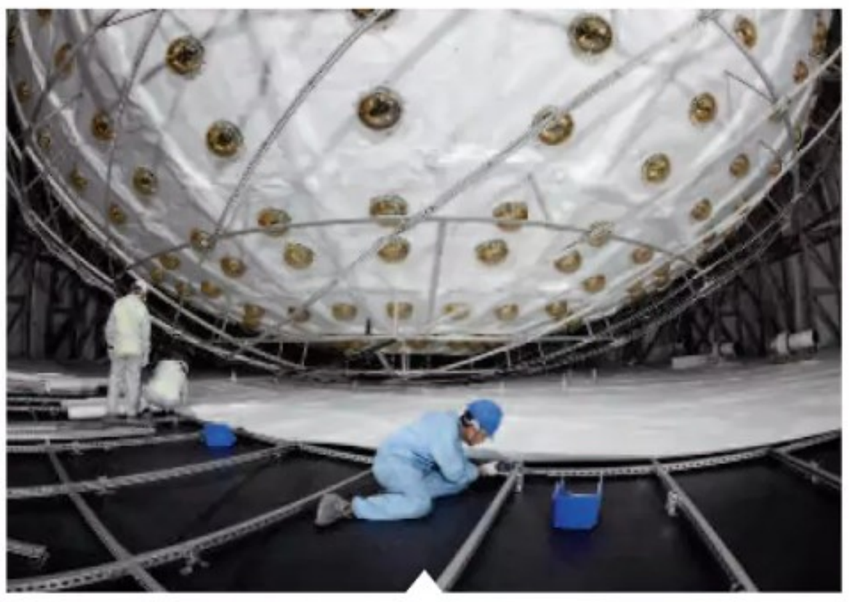
NASA/JPL-CALTECH

Reconstitution du scénario probable de l'atterrissage brutal de l'hélicoptère de la Nasa sur la planète Rouge le 18 janvier 2024.

Un an après le crash sur Mars de l'hélicoptère Ingenuity — premier engin à réaliser un vol motorisé sur une autre planète que la Terre — les ingénieurs de la Nasa ont reconstitué les causes probables de l'accident. Ils ont analysé les données de vol, les images de la caméra du petit aéronef de 1,8 kg et celles prises quelques semaines plus tard par le rover Perseverance. Le 18 janvier 2024, alors qu'Ingenuity réalisait son 72e vol et amorçait une descente à 12 m d'altitude, le système de navigation aurait mal évalué la nature du sol, des petites dunes de sable dénuées de repères qui auraient permis à l'hélicoptère de calculer sa position. Atteignant la surface martienne trop rapidement, il heurta avec ses pieds la crête d'une dune. En tanguant et roulant, l'hélicoptère aurait brisé ses quatre pâles aux deux tiers de leur longueur et projeté l'une d'elles à une quinzaine de mètres de distance. **F. D.**

EN DEUX MOTS

PLANÈTE SÈCHE. Une analyse de l'atmosphère de Vénus révèle que la planète n'a jamais abrité d'océans d'eau liquide et n'aurait jamais été habitable. **MISSION DANGEREUSE.** Le 24 décembre 2024, la sonde Parker Solar Probe de la Nasa s'est approchée à une distance record de seulement 6,1 millions de kilomètres de la surface du Soleil. **SURSAUT TRACÉ.** Un sursaut radio rapide a pu être relié directement à une étoile à neutrons, ce qui confirme l'origine de ces flashs d'énergie très puissants.


JIN LIWANG/XINHUA/AFP

Cette sphère de 35,5 m est le cœur du détecteur.

Un détecteur géant de neutrinos va démarrer en Chine

PHYSIQUE L'observatoire Juno s'apprête à démarrer sa traque des neutrinos. Construit à 700 mètres de profondeur à Jiangmen (Chine), le cœur du détecteur est une sphère de 35,5 mètres de diamètre, remplie de 20 000 tonnes de liquide scintillant capable d'émettre un flash lumineux dès qu'un neutrino réagira avec lui. Ces particules de masse infime interagissent très peu avec la matière, d'où le gigantisme de l'installation. **F. N.**

4,43 à 4,53 milliards d'années

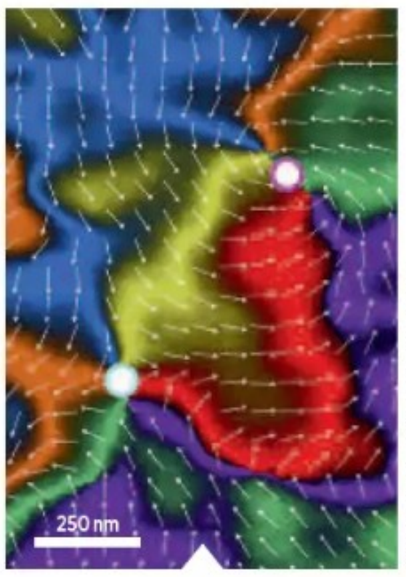
L'âge réévalué de la Lune

SÉLÉNOLOGIE Alors que l'on estimait son âge à 4,35 milliards d'années, la Lune se serait formée un peu plus tôt. Mais elle aurait migré vers une orbite où l'influence gravitationnelle de la Terre aurait conduit à une fusion partielle de son manteau. De quoi remettre à zéro les « horloges isotopiques » qui servent à la dater. **F. N.**

SOURCE : FRANCIS NIMMO, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SANTA CRUZ (ÉTATS-UNIS).

Première image d'un alteraimant

MATÉRIAUX Découvert il y a un an, un nouveau type de matériau magnétique qualifié d'altermagnétique a été visualisé pour la première fois à l'université de Nottingham (Royaume-Uni). Les images ont été produites grâce à des rayons X éclairant un échantillon de tellurure de manganèse. Ce matériau émet alors des électrons dévoilant l'organisation magnétique, en particulier de minuscules vortex d'une centaine de millionièmes de mètre de large. De tels « alteraimants » pourraient permettre d'augmenter d'un facteur mille les capacités de stockage des mémoires magnétiques. **F. D.**



UNIVERSITY OF NOTTINGHAM, EPFL

Le matériau émet des électrons révélant d'infimes vortex (en blanc).

L'engin s'élance sur ses pattes pour s'envoler.

ALAIN HERZOG / EPFL

Google fiabilise les processeurs quantiques

INFORMATIQUE Les qubits à la base des ordinateurs quantiques sont extrêmement sensibles aux perturbations extérieures qui compromettent leurs calculs. Pour pallier ce problème, des chercheurs de Google Quantum AI ont fait la démonstration avec le processeur Willow d'une méthode de correction d'erreurs dite sous le seuil, où l'ajout de qubits renforce la fiabilité. Jusqu'ici, leur multiplication accroissait aussi les erreurs. **F. N.**

Le drone qui se prend pour un oiseau

ROBOTIQUE Long de 50 cm et muni d'une hélice à l'avant, Draven est capable de s'appuyer sur ses pattes pour s'envoler. Il atteint une vitesse comparable à celle de vrais oiseaux, à savoir 2,4 mètres par seconde. Il peut s'élancer sans moteur pour économiser de l'énergie, marcher, faire un saut de 26,6 cm pour franchir un fossé ou aller se percher à 37 cm de haut. **A. D.**

SOURCE : WON DONG SHIN, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (SUISSE).

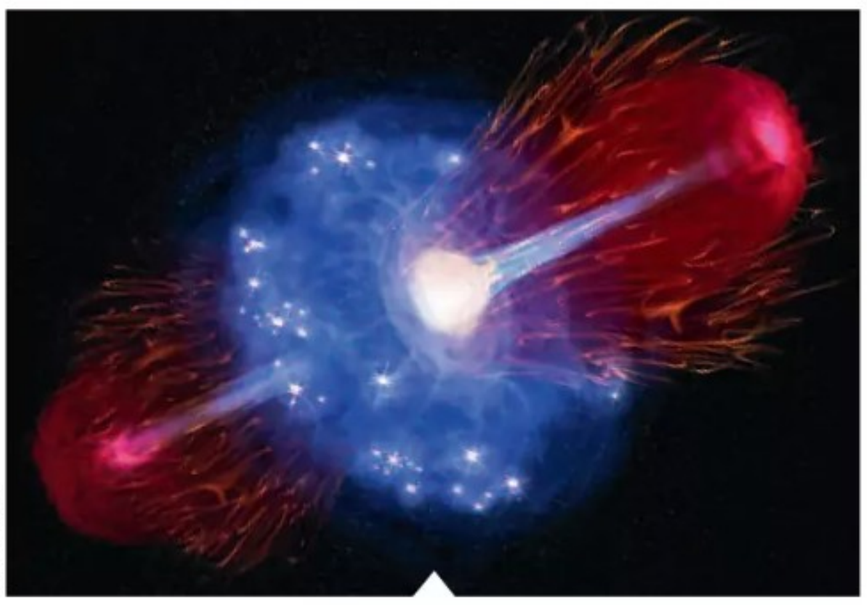
Des mains de pianiste dans un modèle numérique

MODÉLISATION Les mouvements des mains de 15 pianistes de haut niveau ont été captés alors qu'ils jouaient des pièces difficiles pendant dix heures. Ces données ont permis de bâtir un modèle numérique animé par intelligence artificielle : en soumettant une partition au modèle, celui-ci génère une animation montrant comment placer et déplacer les doigts. Objectif : améliorer le confort de jeu et éviter les douleurs des pianistes. **A. D.**

SOURCE : RUOCHENG WANG, UNIVERSITÉ STANFORD (ÉTATS-UNIS).

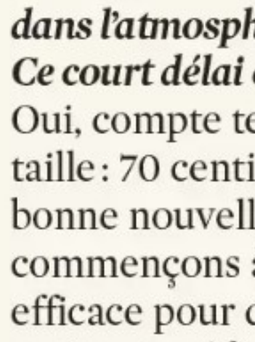
La sieste du trou noir géant

ASTROPHYSIQUE Une sieste après un bon repas ? C'est commun chez les humains, et désormais chez les jeunes trous noirs supermassifs. Le télescope spatial James-Webb en a repéré un de 400 millions de masses solaires, seulement 800 millions d'années après le Big Bang. Un record de précocité. Mais il ne consomme pratiquement pas de matière. Cela suggère que les trous noirs supermassifs ne grossiraient pas continuellement, mais par violentes poussées lors de festins pantagruéliques. Avant de faire une pause... **F. N.**



JIARONG GU

La croissance rapide du trou noir supermassif serait entrecoupée de moments de pause (vue d'artiste).



C. SUZZI/HANS LUCAS/ESA

QUESTIONS À

Patrick Michel

Astrophysicien à l'observatoire de la Côte-d'Azur (CNRS)

« La surveillance des astéroïdes est efficace »

L'astéroïde COWEPC5 n'a été détecté que douze heures avant de se consumer dans l'atmosphère, le 3 décembre 2024. Ce court délai est-il normal ?
Oui, compte tenu de sa toute petite taille : 70 centimètres. C'est même une bonne nouvelle, qui montre que nous commençons à être organisés de façon efficace pour détecter l'arrivée d'objets si petits et prédire le moment et l'endroit de leur impact, en échangeant rapidement les informations depuis plusieurs continents.

À partir de quelle taille un astéroïde est-il considéré comme menaçant ?
Un diamètre supérieur à 1 kilomètre correspond au seuil de catastrophe à l'échelle du globe. Nous avons dressé l'inventaire de plus de 90 % des astéroïdes de ce type, et aucun ne nous menace dans les siècles à venir. L'objectif est désormais de réaliser cet inventaire pour les objets plus grands que 140 mètres, correspondant au seuil de catastrophe à l'échelle d'une région ou d'un petit pays. Nous n'en connaissons que 40 %.

COWEPC5 a explosé au-dessus d'Olekminsk, en Iakoutie (Russie). On se souvient de Tcheliabinsk en 2013. Y a-t-il des régions du globe plus exposées ?
Les chutes se produisent de façon aléatoire. La Russie est le pays qui a la plus grande surface, donc ce n'est pas étonnant qu'il en subisse plus. Quand une chute se produit au-dessus d'une mer ou d'un océan, qui représentent deux tiers de la surface du globe, il est plus difficile d'en témoigner. **Propos recueillis par F. N.**

VOLVO

LA VOLVO LA PLUS SÛRE JAMAIS CONÇUE.

Parce que la sécurité est notre bien le plus précieux, le Volvo EX90 7 places 100% électrique est équipé d'un système de sécurité extérieure, alimenté par un LiDAR, 7 caméras, 5 radars et 12 capteurs ultrasons. Pour que vous puissiez profiter pleinement de la route avec votre famille en toute sécurité.

VOLVO

EX90

RCS Nanterre n° 479 807 141.

A 0g CO_2/km
B
C
D
E
F
G

Modèle présenté : Volvo EX90 Twin Performance Ultra avec options.
Consommation : 20.6 kWh/100 km – CO_2 rejeté 0 g/km.
Autonomie (cycle mixte WLTP) : 619 km. Détails sur volvocars.fr

VOLVOCARS.FR

Pensez à covoiturer. #SeDéplacerMoinsPolluer

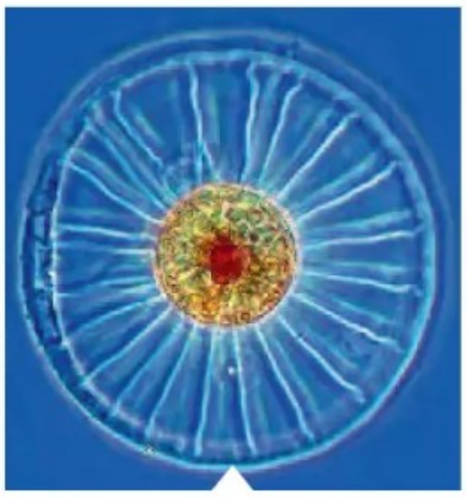
239 000

Le nombre de décès en Europe en 2022 à cause des particules fines

POLLUTION Si ce nombre est en baisse de 5 % sur un an et de 45 % depuis 2005, la pollution de l'air demeure la menace environnementale la plus importante pour la santé, selon l'Agence européenne de l'environnement. Les pays les plus touchés par ce phénomène sont l'Italie, la Pologne et l'Allemagne. **M. N.**

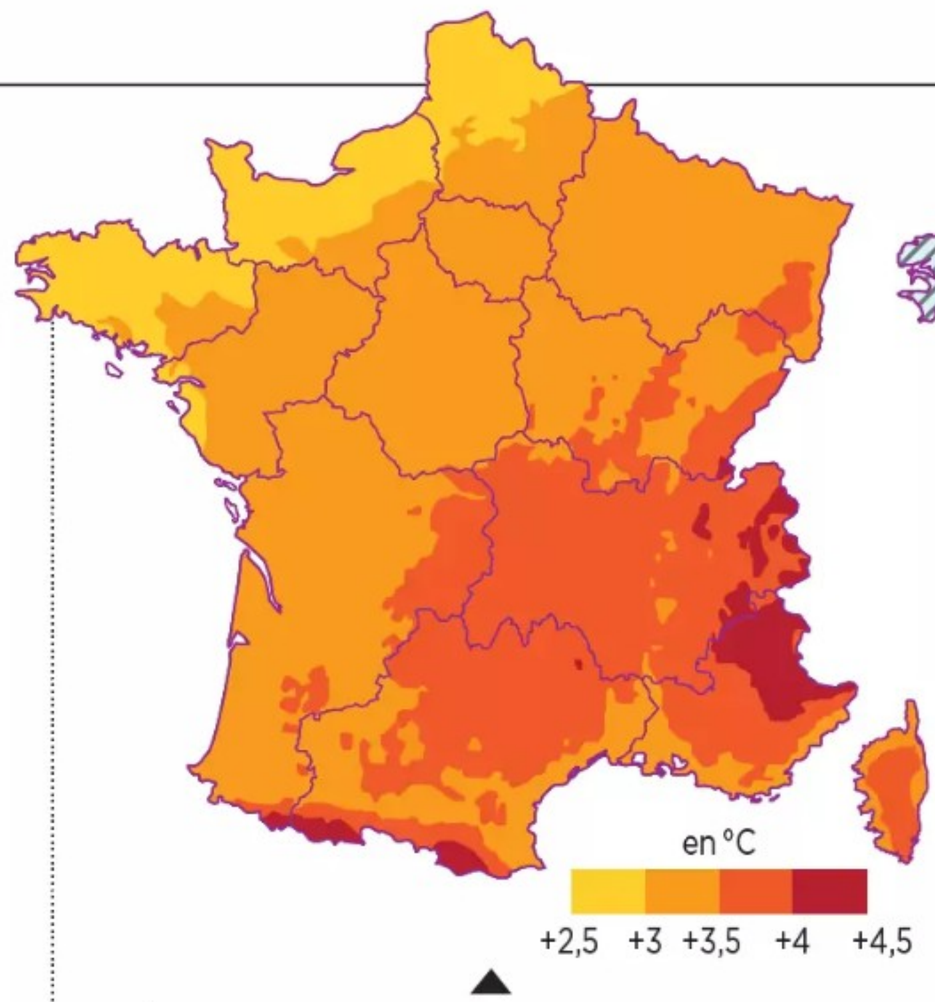
Le plancton a des yeux !

OCÉANOLOGIE Des scientifiques du CNRS et de Sorbonne Université ont découvert que les diatomées, une espèce de phytoplancton, utilisent des cellules pour détecter les variations de lumière dans la colonne d'eau. Ce sont les diatomées vivant au-delà des tropiques qui possèdent le plus de « phytochromes ». Les mers tempérées et arctiques sont en effet plus agitées et les variations de la durée du jour plus importantes. **L. C.**

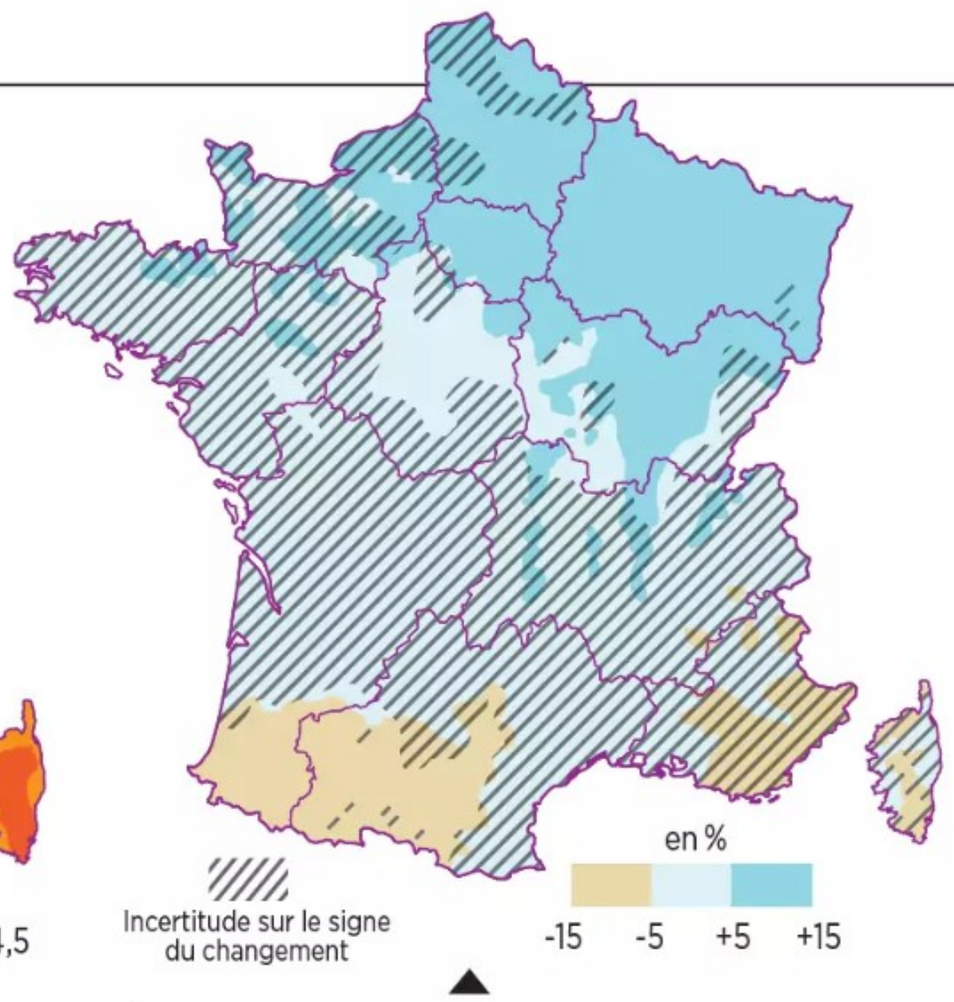


JOHN DOLAN/CNRSIMAGES

La diatomée détecte les variations de lumière grâce à des capteurs.



Évolutions des températures moyennes en 2100 selon le scénario médian à +4 °C.



Évolutions des cumuls annuels de précipitations en 2100 selon le scénario médian à +4 °C.

Le bulletin météo pour 2100 a été publié

Météo-France a modélisé le climat futur sur l'Hexagone: le Nord-Ouest connaîtra une hausse inférieure de 1 °C en moyenne par rapport au Sud-Est.

Avec des pluies en hausse de 10 % et un ensoleillement en berne de 10 %, l'année 2024 fait pourtant partie des cinq années les plus chaudes connues par la France depuis le début du XXe siècle. En présentant ce bilan annuel le 19 décembre dernier, Météo-France a enclenché une nouvelle procédure d'anticipation du climat futur sur l'Hexagone. Cette « trajectoire de réchauffement pour l'adaptation au changement climatique » (Tracc) suivra année par année jusqu'en 2100 la hausse de la température moyenne annuelle de la France. Celle-ci devrait alors culminer à 14,2 °C contre 10,9 °C sur la période 1976-2005.

La France se réchauffe plus vite que le reste de la planète parce que c'est un pays tempéré proche de l'océan. Le 1,5 °C supplémentaire que la planète devrait atteindre en 2030 implique pour la France une température moyenne de +2 °C, seuil inscrit dans l'accord de Paris de 2015. Quand le monde atteindra les 2 °C de plus, la France sera à 2,7 °C, ce qui devrait arriver autour de 2050. Enfin, les 3 °C planétaires de plus équivalant à 4 °C pour l'Hexagone arriveront à la fin du siècle.

Un réchauffement plus marqué en été qu'en hiver

Cette trajectoire est calculée sans prendre en compte l'engagement des États à atteindre la neutralité carbone en 2050. Si ceux-ci limitent bien leurs émissions de gaz à effet de serre, la hausse sera moindre. Le nord-ouest du territoire connaîtra une hausse inférieure de 1 °C en moyenne annuelle par rapport aux régions du sud-est et aux Alpes. Le réchauffement sera plus marqué en été qu'en hiver, de l'ordre de 1 °C supplémentaire. L'agglomération parisienne aura des températures enregistrées aujourd'hui à Montpellier, la ville méditerranéenne connaissant de son côté le climat de l'Andalousie. Les prévisions sont moins claires pour les pluies. Les simulations révèlent une légère augmentation des précipitations sur le quart nord-est du pays. Mais il n'y a pas de tendance claire sur le reste de la France, à part dans le Sud-Ouest où les pluies devraient être plus abondantes de 15 % l'hiver et en baisse de 20 % l'été. **L. C.**

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE: MÉTÉO-FRANCE

La plus grande archive climatique

PALÉOCLIMATOLOGIE C'est un nouveau record : une carotte de glace longue de 2800 mètres a été extraite de la calotte antarctique. Elle devrait fournir un enregistrement climatique continu d'au moins 1,2 million d'années, soit 400 000 ans de plus que ce dont on disposait jusqu'à présent grâce à une carotte prélevée en 2004. Le forage par un consortium international de scientifiques se poursuit pour atteindre les roches sous la glace. **M. N.**

ELLES ONT DIT

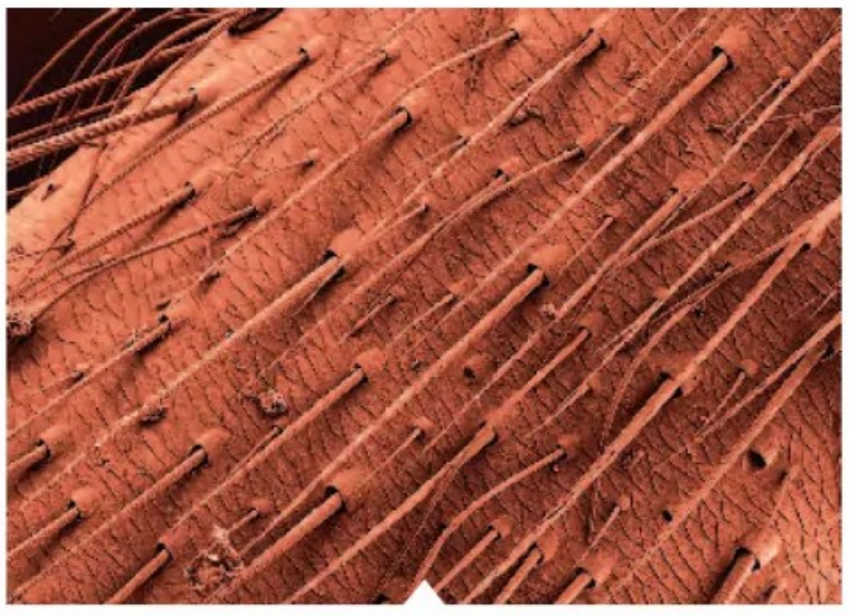
« Le premier jour sans glace dans l'océan Arctique pourrait survenir avant 2030 »

Céline Heuzé (université de Göteborg, en Suède) et **Alexandra Jahn** (université du Colorado à Boulder, aux États-Unis), après avoir étudié des centaines de scénarios de fonte de la banquise.

Les araignées sentent avec leurs pattes

ARACHNOLOGIE Les argiopes frelons mâles (*Argiope bruennichi,* également appelée araignée guêpe ou épeire fasciée) détectent les odeurs grâce à des structures sensorielles, les sensilles, situées sur la partie supérieure des pattes. Elles leur permettent de repérer les phéromones sexuelles. Les chercheurs ont par ailleurs confirmé la présence de sensilles gustatives sur la partie inférieure des pattes, cette fois chez les mâles et les femelles. **J. de C.**

SOURCE : MOHAMMAD BELAL TALUKDER, UNIVERSITÉ DE GREIFSWALD (ALLEMAGNE).



BELAL TALUKDER

Les sensilles, sortes de tiges sensorielles situées sur les pattes du mâle, lui permettent de détecter les odeurs.

JC MILHET/HANS LUCAS

Millas, dans les Pyrénées-Orientales, le 16 janvier 2024.

L'aridité gagne peu à peu

CLIMATOLOGIE 77,6 % de la surface terrestre a connu des conditions plus sèches lors de ces trente dernières années que dans les décennies précédentes. Depuis le début des années 1990, les zones arides ont crû de 4,3 millions de km², couvrant désormais 40,6 % des terres, Antarctique exclue. 40 % des terres arables sont aujourd'hui touchées par l'aridification. **L. C.**

SOURCE : CONVENTION DES NATIONS UNIES SUR LA LUTTE CONTRE LA DÉSERTIFICATION, DÉCEMBRE 2024.

Les espèces invasives menacées à leur tour

Parmi les 230 espèces de mammifères étudiées, 36 sont en danger d'extinction dans leur aire de répartition d'origine.

CYRIL RUOSO/BIOSPHOTO

La chasse constitue le premier des dangers pour ces espèces (ici un lapin de garenne).

Les espèces invasives contribuent à 60 % au moins des extinctions mondiales, selon la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBS) ; mais nombre d'entre elles sont aussi menacées. C'est ce qu'a établi une équipe de recherche de l'université de Vienne (Autriche). Parmi les 230 espèces invasives de mammifères étudiées, 36 sont menacées dans leur aire de répartition d'origine. La plupart de ces espèces viennent d'Asie du Sud-Est et s'établissent plutôt dans l'est de l'Australie, mais aussi dans les régions insulaires de l'Asie du Sud-Est. La principale menace qui pèse sur elles dans leur habitat d'origine est la chasse. C'est aussi la première raison pour laquelle elles ont été introduites dans d'autres habitats au XIXe siècle ! Ainsi, le lapin de garenne est en danger d'extinction dans sa région native — notamment en Espagne — mais sa prolifération est très problématique en Australie. **A.-S. T.**

ADRIEN LESAFFRE

« Canis simensis » (loup éthiopien) peut visiter jusqu'à 30 plantes d'affilée (ici, goûtant le pollen de « Kniphofia foliosa »).

Les loups butinent, eux aussi

Ces carnivores ont été observés en train de se nourrir du nectar d'une plante des hauts plateaux éthiopiens.

Des museaux couverts de pollen ! Des loups d'Éthiopie (ou loups d'Abyssinie), un des carnivores les plus rares et menacés d'Afrique, ont été observés en train de se nourrir de nectar. Ils consomment celui de *Kniphofia foliosa*, une plante endémique des hauts plateaux éthiopiens. La découverte a été faite par une équipe de l'Ethiopian Wolf Conservation Programme qui a suivi pendant plusieurs jours six loups de trois meutes différentes. Ils ont alors observé que les canidés se délectent de ce breuvage pendant 3 à 15 secondes, visitant jusqu'à 30 plantes lors d'une sortie. Ce comportement, commun à plusieurs meutes, suggère que les loups d'Éthiopie pourraient jouer un rôle de pollinisateurs.

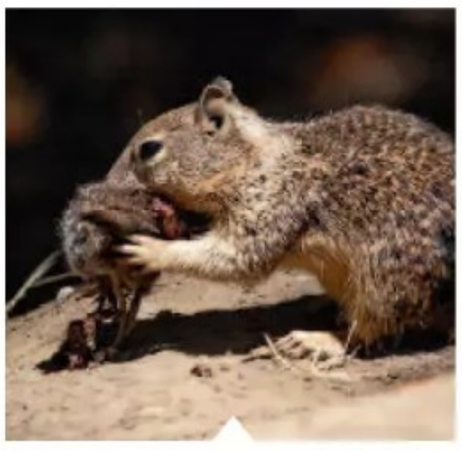
Les chercheurs approfondissent leurs travaux pour évaluer une éventuelle coévolution entre les loups d'Éthiopie et ces plantes, en étudiant l'impact écologique de ce comportement, sa transmission au sein des meutes et son rôle dans la pollinisation. **J. de C.**

SOURCE : SANDRA LAI, UNIVERSITÉ D'OXFORD (ROYAUME-UNI).

Les écureuils sont des chasseurs impitoyables

ÉTHOLOGIE Non, les écureuils ne se nourrissent pas que de fruits secs ou de graines. Ce sont aussi des prédateurs, ce qui avait totalement échappé aux éthologues jusqu'à ce qu'ils observent l'été dernier que les rongeurs s'attaquent aux campagnols, notamment quand leur population augmente. Le plus souvent en les poursuivant jusqu'à les attraper et les mordre au cou. **M. N.**

SOURCE : JENNIFER SMITH, UNIVERSITÉ DU WISCONSIN À EAU CLAIRE (ÉTATS-UNIS).



AFP

Spermophile de Californie dévorant un campagnol, photographié aux États-Unis en décembre 2024.

Près des glaciers, une biodiversité unique

ÉCOLOGIE Les cours d'eau alimentés par les glaciers présentent une biodiversité microbienne exceptionnelle. Un résultat sur plus de 150 cours d'eau qui a surpris les chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), lesquels s'attendaient à une diversité faible en raison des conditions ambiantes extrêmes. Or, près de la moitié des bactéries sont endémiques dans la chaîne de montagnes concernée. **M. N.**

10 %

La part des énergies renouvelables dans les transports en Europe

DÉCARBONATION En 2023, 18,5 millions de tonnes d'équivalent pétrole (tep) de biocarburants ont été consommées par les camions et les véhicules particuliers européens. Pour les voitures électriques, c'est l'équivalent de 2,4 millions de tep. 2 351 741 véhicules électriques ont été immatriculés en Europe cette même année. **L. C.**

Les vaches émettent moins de méthane avec des algues au menu

ENVIRONNEMENT Le méthane libéré par les vaches au cours de la rumination peut chuter de près de 40 % si des extraits d'algues rouges sont incorporés à leur alimentation, selon une étude américaine sur des animaux en conditions réelles d'élevage. Les algues rouges comportent des composés halogénés, tels que le bromoforme, qui bloquent la production du méthane par les archées, des micro-organismes présents dans la panse des ruminants. **P. K.**

SOURCE : PAULO MEO-FILHO, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, DAVIS (ÉTATS-UNIS).

CH4 GLOBAL

L'algue rouge peut réduire de 40 % les émissions bovines de méthane.

EN COMPLÉMENT DE VOTRE ÉCHARPE FAVORITE

COMPLÉMENT ALIMENTAIRE

Disponible en pharmacie ou sur lehning.com

-10%

sur votre première commande sur lehning.com avec **le code promo BIENVENUE***

90 ANS

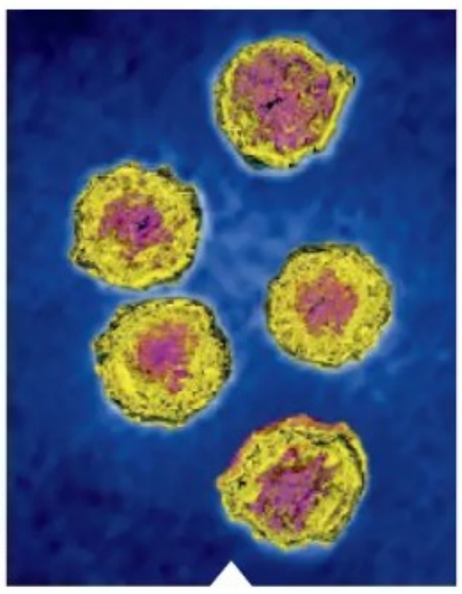
LEHNING
LABORATOIRES

MÉDICATION VÉGÉTALE DEPUIS 1935

Pour votre santé, pratiquez une activité physique régulière. www.mangerbouger.fr

*valable sur une première commande à la création d'un compte client. Conditions de l'offre, mentions légales et conditions générales de vente disponibles sur le site www.lehning.com

2024-PI-113



CAVALLINI/BSIP

Vue au microscope du virus responsable de la poliomyélite.

Le poliovirus détecté en Europe

ÉPIDÉMIOLOGIE Des traces de poliovirus ont été trouvées dans les eaux usées de plusieurs régions, dont le Royaume-Uni, l'Allemagne et la Guyane, selon *Science*. Lié à une souche apparue au Nigeria et répandue en Afrique, il a été importé en Europe par des individus contaminés. Aucune paralysie (principal symptôme causé par le virus) n'a été signalée grâce à des taux de vaccination élevés, mais les scientifiques surveillent les zones à risque, comme l'Ukraine. **E. T.**

IL A DIT

« Nous avons découvert une signature moléculaire unique des sept premiers jours suivant la vaccination qui pourrait prédire la longévité de la réponse »

Bali Pulendran, professeur en microbiologie et immunologie à l'université Stanford (États-Unis).

Une méthode simple révèle l'âge biologique

Des chercheurs américains ont voulu savoir dans quelle mesure la perte de masse musculaire est révélatrice de l'âge d'une personne.

Rester debout sur une jambe le plus longtemps possible : c'est la méthode la plus simple pour estimer son âge biologique, ont établi des chercheurs de la clinique Mayo aux États-Unis dans la revue *Plos One*. Certes, le résultat est moins précis qu'avec une analyse détaillée des méthylations dans son ADN, mais elle ne nécessite aucun appareillage. Les scientifiques sont partis du constat que la masse musculaire diminue significativement avec l'âge. Cette perte commence avant la quarantaine et s'accélère après la soixantaine, causant une fragilité grandissante qui augmente le risque de chute et donc de fracture.

Les chercheurs ont voulu étudier à quel point cette perte de masse musculaire était indicative de l'âge. Pour cela, ils ont évalué la force musculaire chez 40 personnes de plus de 50 ans, avec autant de femmes que d'hommes. Ils ont d'abord observé à quel point les personnes bougeaient involontairement lorsqu'elles étaient debout, les yeux ouverts : ce mouvement augmente d'environ 6,3 % par décennie. Avec les yeux fermés, il devient plus prononcé et augmente de 10,4 % par décennie. Ensuite, les participants devaient rester en équilibre sur une seule jambe le plus longtemps possible. Ce temps, qui est d'au moins 30 secondes avant 50 ans, diminue rapidement avec l'âge, et baisse plus rapidement avec la jambe non dominante (la jambe gauche pour les droitiers et inversement).

JOSEF FSON/PLAIN PICTURE

Tenir 10 secondes en équilibre après 65 ans

Leurs données révèlent que les hommes de moins de 65 ans peuvent rester en moyenne un peu plus d'une vingtaine de secondes sur une jambe (25 et 22 secondes en fonction de la jambe), contre une dizaine (9 avec les deux jambes) après 65 ans. Les durées sont proches chez les femmes mais diminuent moins rapidement (entre 20 et 18 secondes avant 65 ans, 13 et 11 secondes après). Les chercheurs concluent que ce simple test est un bon indicateur de l'état de santé de l'individu, et peut permettre de déterminer si l'âge neuromusculaire d'une personne est corrélé ou pas à son âge chronologique. **N. G. C.**

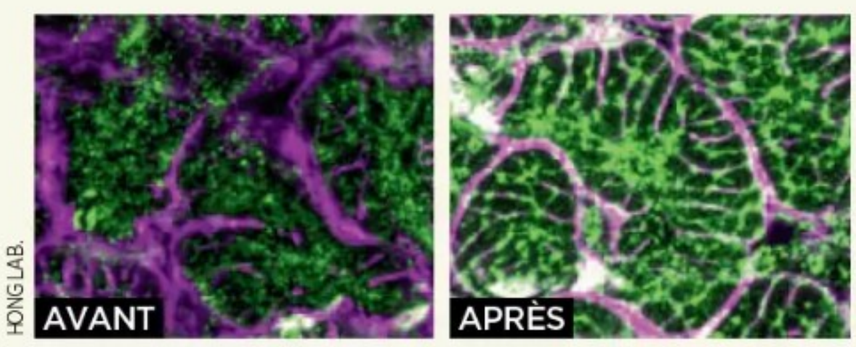
Les organes s'entraînent dans leur chute

Des chercheurs ont montré que le vieillissement cellulaire du foie entraîne celui du rein et du cerveau.

K. H. FUNG/SPL/SUCRE SALÉ

En voyageant dans le sang, les protéines chargées de signaler au système immunitaire la présence de cellules vieillissantes dans le foie affectent d'autres organes.

Le vieillissement est peut-être contagieux… non pas d'une personne à l'autre, mais d'un organe à l'autre. C'est le cas de l'insuffisance hépatique aiguë, un dysfonctionnement grave du foie qui entraîne souvent des problèmes tels que des insuffisances rénales et des encéphalopathies. Des chercheurs des universités de Glasgow et Édimbourg (Royaume-Uni) viennent de confirmer que le vieillissement cellulaire du foie entraîne celui du rein et du cerveau. *« Nous pourrons ainsi identifier des marqueurs dans le sang indiquant quelles personnes sont les plus à risque de présenter des dysfonctionnements dans d'autres organes à la suite d'un problème grave du foie »*, espère le professeur Rajiv Jalan. La transmission se ferait par des protéines produites pour signaler au système immunitaire la présence de ces cellules vieillissantes et faciliter leur élimination. Mais en voyageant dans le sang, elles affecteraient d'autres organes. **N. G. C.**



HONG LAB.

Vers une thérapie génique contre l'insuffisance cardiaque

CARDIOLOGIE Touchant entre 1 et 2 % de la population française, l'insuffisance cardiaque pourrait être combattue par une thérapie génique. C'est une piste inédite explorée par des chercheurs américains qui ont observé que les patients souffrent d'un déficit d'une protéine, appelée BIN1. Rétablir sa production chez l'animal par un fragment d'ADN étranger *(en vert ci-contre, avant et après la thérapie)* a permis d'améliorer les fonctions cardiaques jusqu'à 30 %. **L. M.**

71 %

La proportion de champignons en excès dans le nez des asthmatiques

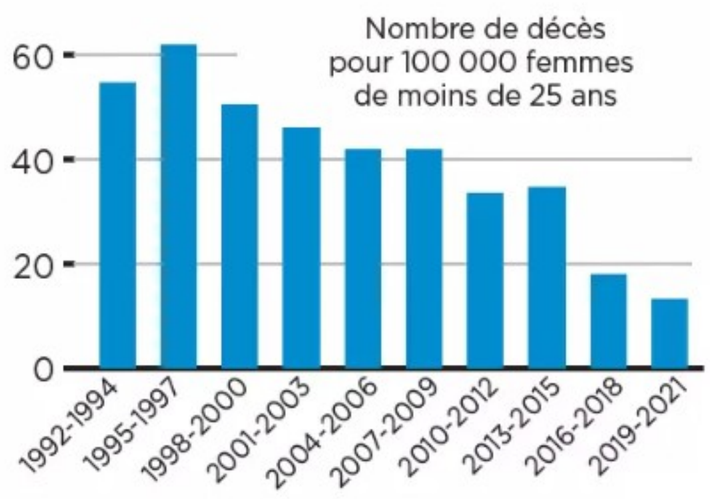
ALLERGOLOGIE Les personnes souffrant d'asthme ou d'allergie ont un mycobiome nasal beaucoup plus diversifié que la population générale. Les scientifiques ont identifié des champignons tels que *Penicillium, Aspergillus, Candida* ou *Malassezia*, reconnus comme allergènes ou opportunistes. **M. P.**

SOURCE : M. PÉREZ-LOSADA, UNIVERSITÉ GEORGE-WASHINGTON (ÉTATS-UNIS).

Le cancer du col de l'utérus baisse chez les jeunes Américaines

ONCOLOGIE De 2016 à 2021, le nombre annuel de cancers du col de l'utérus et les décès associés ont baissé de 62 % chez les femmes de moins de 25 ans aux États-Unis. Il s'agit de la première génération à avoir bénéficié du vaccin contre le papillomavirus. La vaccination actuelle de près de 80 % des jeunes États-uniennes de 13 à 17 ans va renforcer à l'avenir cet effet protecteur. **P. K.**

SOURCE : PORIA DORALI, UNIVERSITÉ DE MÉDECINE DE CAROLINE DU SUD (ÉTATS-UNIS).



SOURCE : JAMA - BRUNO BOURGEOIS

Une banque de cellules de centenaires

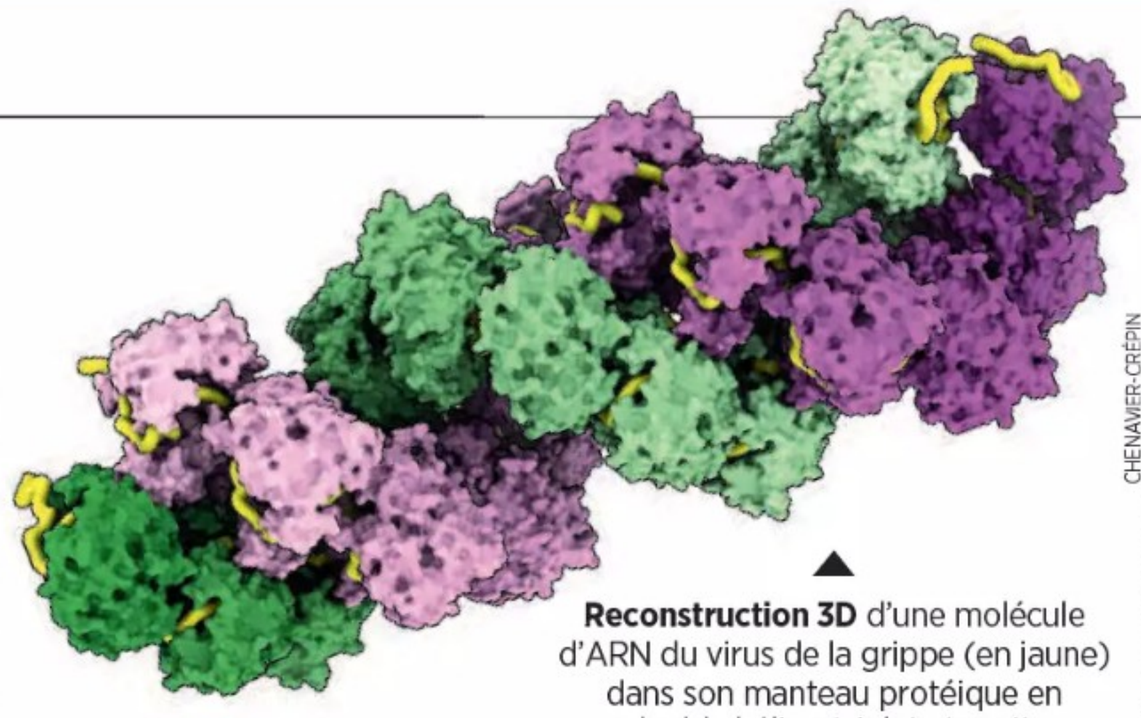
BIOLOGIE Des chercheurs ont créé des cellules souches de personnes centenaires à partir de prélèvements sanguins. Ils ont reprogrammé leurs cellules sanguines pour les faire revenir au stade de cellules souches. Ces dernières, capables de se différencier en n'importe quelle cellule du corps, sont mises à disposition d'autres équipes de recherche. **E. T.**

SOURCE : TODD W. DOWREY, UNIVERSITÉ DE BOSTON (ÉTATS-UNIS).

La bactérie des buveurs de café

NUTRITION La bactérie *Lawsonibacter asaccharolyticus* est jusqu'à huit fois plus abondante dans le microbiote intestinal des buveurs réguliers de café, et cela quels que soient leur âge, leur sexe ou leur état de santé. Sa croissance est stimulée par la présence de la boisson, caféinée ou non, dont elle dégrade les polyphénols caractéristiques. Elle est rare chez les enfants, les singes et les populations éloignées du mode de vie occidental. **P. K.**

SOURCE : PAOLO MANGHI, UNIVERSITÉ DE TRENTE (ITALIE).



CHENAVIER-CRÉPIN

Reconstruction 3D d'une molécule d'ARN du virus de la grippe (en jaune) dans son manteau protéique en double hélice (violet et vert).

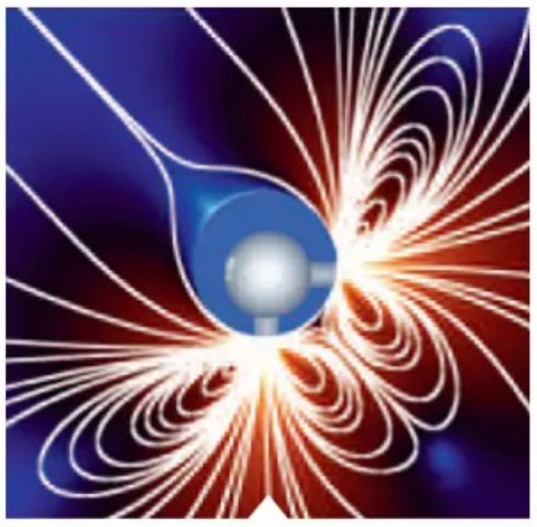
Le virus de la grippe enfin modélisé

VIROLOGIE Après treize ans de recherches, des scientifiques français ont modélisé pour la première fois la structure du virus de la grippe à l'échelle atomique. Leur étude décrit les interactions entre le génome du virus, composé de huit brins d'ARN, et le « manteau » de nucléoprotéines qui l'entoure, formant une double hélice. Ce complexe permet la réplication du virus et constitue une nouvelle cible thérapeutique pour empêcher sa propagation dans l'organisme. **E. T.**

SOURCE : FLORIAN CHENAVIER, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, FRANCE.

Des microrobots anticancéreux à propulsion

THÉRAPEUTIQUE Des chercheurs du Caltech (États-Unis) ont mis au point des microrobots acoustiques, capables de délivrer des traitements de manière ciblée dans l'organisme. Ces sphères du diamètre d'un cheveu renferment des bulles qui, activées par des ultrasons depuis l'extérieur, s'échappent et assurent la propulsion vers sa cible. La capsule, faite d'hydrogel solidifié, est ensuite biodégradée, laissant les principes actifs se diffuser sur la tumeur. Après un essai réussi chez la souris, des essais cliniques chez l'humain se préparent. **E. T.**



CALTECH

Le microrobot contient des microbulles qui propulsent le traitement (simulation).

Le fructose, agent secret du cancer

Des chercheurs ont montré qu'un régime riche en fructose augmente la croissance des tumeurs cancéreuses.

GETTY IMAGES

Ce sucre simple est ajouté à de nombreux aliments par les industriels.

Largement utilisé par l'industrie agroalimentaire américaine pour son pouvoir sucrant et son faible coût, le fructose favorise la croissance des cancers, révèle une étude parue dans la revue *Nature*. Contrairement au glucose, qui sert directement de source d'énergie aux cellules cancéreuses, le fructose induit la production et la sécrétion par le foie de certains lipides utiles aux cellules cancéreuses pour former leurs membranes. Les chercheurs américains de l'université Washington à Saint-Louis (Missouri) ont montré qu'un régime riche en fructose augmente la croissance de diverses tumeurs cancéreuses chez la souris, confirmant des données épidémiologiques selon lesquelles il aggrave le pronostic chez les personnes ayant un cancer.

Ce résultat allonge la liste des actions délétères de ce sucre liées à sa stimulation de la production de lipides par le foie : stockage des graisses par l'organisme, maladies cardio-vasculaires, diabète de type 2. **P. K.**

Les femmes enceintes ont un super-intestin

PHYSIOLOGIE Pour assimiler plus de nutriments nécessaires à son enfant, la surface de l'intestin grêle de la femme enceinte puis allaitante doublerait presque. C'est en tout cas ce que suggère une étude effectuée chez la souris et sur des organoïdes humains par des chercheurs autrichiens de l'université de Vienne. Cette transformation est due à un ralentissement du renouvellement de l'épithélium intestinal, les villosités devenant plus grosses et plus hautes sous l'effet de la prolactine, l'hormone qui stimule aussi la lactation. **P. K.**

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

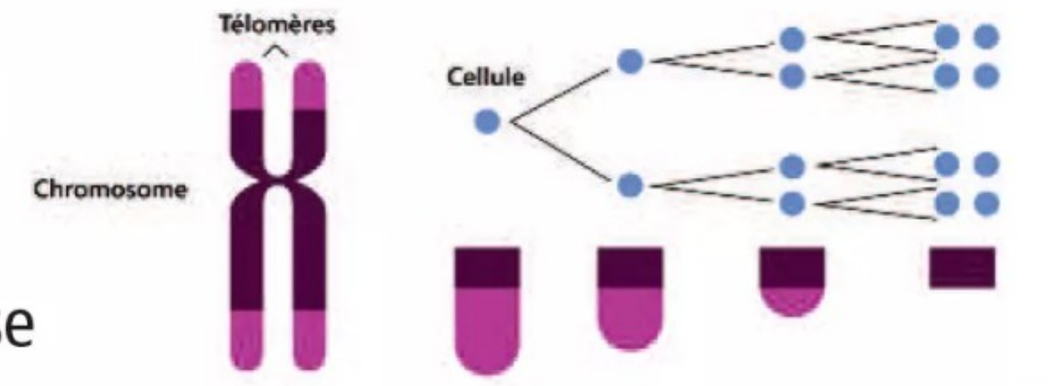
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

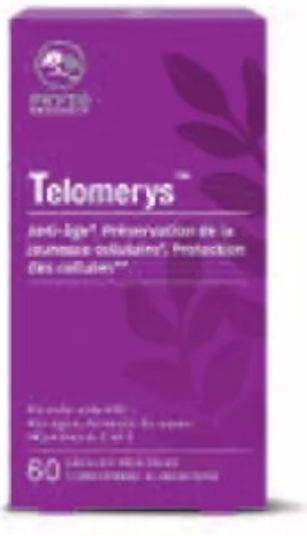
Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire

Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



Des conseils ?
Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 42 32 52** et sur www.telomerys.com

TOM BJÖRKLUND FOR MAX PLANCK INSTITUTE FOR EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY

Représentation de « Zlatý kun ». L'analyse de son crâne, mis au jour en République tchèque, a permis de fournir le plus ancien génome humain moderne.

On a daté le métissage « Sapiens »-Neandertal

Le séquençage du génome d'humains vieux de 45 000 ans montre que l'hybridation entre les deux espèces a eu lieu plus tard que prévu.

Ce sont des travaux à marquer d'une pierre blanche en paléogénomique. Une équipe internationale dirigée par des chercheurs de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutive (Allemagne) est parvenue à séquencer les plus anciens génomes d'êtres humains modernes, vieux de 45 000 ans environ. Ces génomes appartiennent à sept individus dont les restes ont été trouvés à Zlatý kun, en République tchèque, et à Ranis, en Allemagne (230 km séparent les deux sites). Ils mettent en évidence une lignée de *sapiens* jusqu'ici inconnue, qui a divergé le plus anciennement du groupe d'humains modernes sorti d'Afrique, il y a environ 50 000 ans. Il s'agit là de résultats époustouflants, d'abord parce que nos connaissances sur la génétique des premiers humains modernes sont encore très limitées, ensuite parce que les chercheurs ont réussi à obtenir le génome de la plus haute qualité jamais atteinte pour un individu de plus de 10 000 ans.

Une cohabitation durant environ 5000 ans

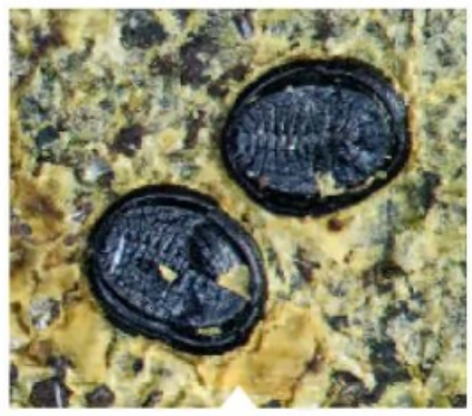
Jusqu'ici, le tout premier métissage entre *Homo sapiens* et Neandertal — qui ont cohabité durant environ 5000 ans en Europe — remontait à une période entre -50 000 et -60 000 ans. Mais en analysant la longueur de ces segments néandertaliens dans le génome de Ranis13, et en utilisant les dates au radiocarbone obtenues sur cet individu, les chercheurs ont établi que l'hybridation *sapiens*-Neandertal était survenue plus tard qu'on ne le pensait, entre 45 000 et 49 000 ans avant le présent. C'est de cette hybridation que toutes les populations humaines actuelles hors d'Afrique tiennent leur 2 à 3 % d'ADN néandertalien. Il y a environ 45 000 à 49 000 ans, une population ancestrale non africaine cohérente devait donc encore exister. Ainsi, *« tout vestige humain moderne trouvé en dehors d'Afrique et datant de plus de 50 000 ans n'a pas pu faire partie de la population non africaine ancestrale qui s'est hybridée avec les néandertaliens et dont on trouve aujourd'hui les descendants dans une grande partie du monde »*, conclut Johannes Krause, l'un des auteurs principaux de l'étude. **M. B.**

Accrochés sous une feuille depuis 15 millions d'années

PALÉONTOLOGIE

Des pupes d'aleurodes, minuscules mouches aux ailes blanches, ont été découvertes à l'envers d'une feuille fossilisée datant de 15 millions d'années, dans le cratère d'Hindon Maar, en Nouvelle-Zélande. Ce fossile, exceptionnellement préservé, révèle une nouvelle espèce et témoigne de la richesse de la forêt tropicale qui y régnait. Le site a déjà livré plus de 750 fossiles d'insectes. **J .I.**

SOURCE : JOWITA DROHOJOWSKA, UNIVERSITÉ DE SILÉSIE, POLOGNE.



DROHOJOWSKA ET AL

Les pupes d'aleurodes mises au jour en Nouvelle-Zélande.

IL A DIT

« C'est un rappel brutal que les peuples préhistoriques pouvaient rivaliser avec les atrocités modernes »

Rick Schulting, chercheur à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), principal auteur d'une étude révélant le plus grand massacre connu de la préhistoire britannique durant l'âge de bronze, qui s'est accompagné d'actes de cannibalisme.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0225

La syphilis nous viendrait d'Amérique

Des analyses ADN révèlent que la maladie sévissait déjà sur le continent avant l'arrivée de Christophe Colomb.

La syphilis, qui a ravagé l'Europe dès 1495, pourrait avoir ses racines dans les Amériques. Une étude de l'institut Max-Planck à Leipzig (Allemagne) a analysé l'ADN extrait de squelettes anciens retrouvés au Mexique, au Chili, en Argentine et au Pérou : les chercheurs ont reconstitué cinq génomes de *Treponema pallidum*, la bactérie responsable de la syphilis, et démontré que ces souches existaient sur le continent bien avant l'arrivée de Christophe Colomb. Datées au radiocarbone, ces souches partagent un ancêtre commun vieux de 9000 ans, à une époque où les populations autochtones étaient géographiquement isolées. Ces résultats prouvent que les maladies syphilitiques étaient déjà présentes sur le continent. Cependant, des traces de lésions similaires sur des os européens antérieurs à 1492 alimentent toujours le débat sur les origines de ces maladies. **E. T.**

AKG IMAGES

La maladie sexuellement transmissible s'est propagée sur le Vieux Continent à partir de 1495 (gravure illustrant un livre de médecine du XVe siècle).

JESSI LEMAY/DRI

La pollution au plomb a fait perdre des points de QI aux Romains

ANTIQUITÉ Des carottes de glace prélevées en Arctique ont révélé que la pollution au plomb sous l'Empire romain avait atteint des niveaux tels que la population aurait connu un déclin cognitif. Une baisse de 2 à 3 points de QI aurait été à déplorer, selon des chercheurs de l'université d'État de l'Arizona (États-Unis). En cause : l'extraction de l'argent, qui relâchait de grandes quantités de plomb volatil. **M. B.**

Près de 2 millions d'euros pour un « aureus »

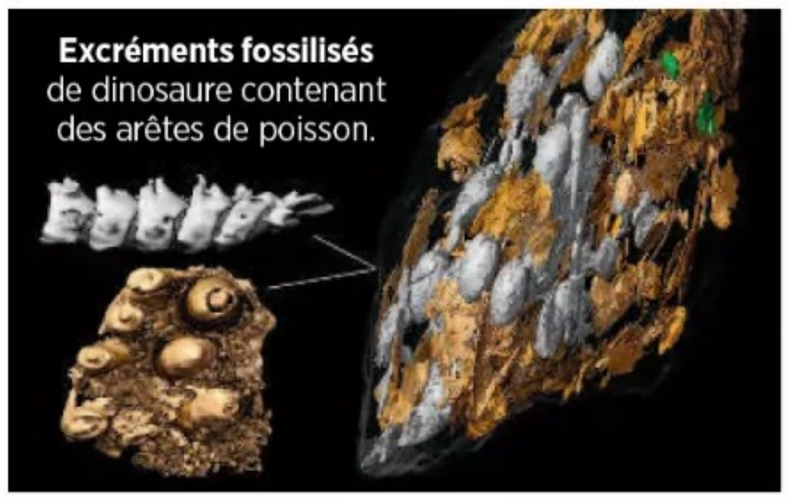
NUMISMATIQUE Une pièce d'or romaine à l'effigie de Brutus (85-42 avant notre ère) a été adjugée pour 1,98 million d'euros aux enchères, le 9 décembre dernier à Genève (Suisse). Et pour cause : cet *aureus* rarissime datant de 43 ou 42 avant notre ère n'a pas été frappé à Rome mais dans des ateliers itinérants au service des opposants de César. Passé discrètement de main en main à travers les siècles, il fait partie d'une liste de 17 spécimens semblables connus. **M. B.**

NUMISMATICA GENEVENSIS SA

La monnaie d'or romaine, datée de 43 ou 42 avant notre ère, est frappée à l'effigie de Brutus.

Les traces de deux espèces pré-humaines saisies le même jour au même endroit

PALÉOANTHROPOLOGIE Il a 1,5 million d'années, deux espèces pré-humaines différentes — *Homo erectus* et *Paranthropus boisei* — ont marché dans la boue et y ont laissé des empreintes fossiles à quelques heures d'intervalle seulement. Leurs traces de pas, découvertes près de la rive de ce qui deviendra un jour le lac Turkana, dans l'actuel Kenya, constituent la toute première preuve matérielle de la coexistence de plusieurs espèces d'homininés bipèdes au même endroit et au même moment. **M. B.**



MARTIN QVARNSTRÖM

Excréments fossilisés de dinosaure contenant des arêtes de poisson.

Le régime des premiers dinosaures

PALÉONTOLOGIE En étudiant les restes pétrifiés des résidus de leur système digestif, des scientifiques suédois et polonais ont établi que les premiers dinosaures qui vivaient il y a 230 millions d'années étaient omnivores. Ils se nourrissaient d'insectes, de poissons et de végétaux. À l'inverse, leurs concurrents, les dicynodontes, étaient des herbivores consommant aussi du charbon pour lutter contre les toxines de certaines plantes. **J. I.**

Lucy courait bien, mais lentement

PALÉOANTHROPOLOGIE En plus de savoir grimper aux arbres, Lucy était capable de courir sur deux jambes, mais beaucoup plus lentement que nous. C'est la conclusion à laquelle sont parvenus des chercheurs de l'université de Liverpool (Royaume-Uni) qui ont modélisé le corps d'*Australopithecus afarensis* afin d'analyser ses capacités athlétiques. Pour atteindre au plus 5 mètres par seconde, elle devait brûler en revanche deux à trois fois plus d'énergie qu'*Homo sapiens* à son maximum, en raison d'un tendon d'Achille très court. **N. G. C.**

J. M. LAHNAKOSKI ET AL.

Les endroits du corps où est ressenti le bonheur chez l'humain actuel (à gauche) et chez les Mésopotamiens (à droite).

Le bonheur est dans le foie

ANTIQUITÉ Une analyse de textes en caractères cunéiformes rédigés durant la période néo-assyrienne suggère que les Mésopotamiens concevaient les émotions d'une manière différente de la nôtre, il y a près de 3000 ans. Ils ressentaient le bonheur dans le foie, la surprise dans les reins, le dégoût aux tibias, la souffrance aux aisselles, l'excitation sexuelle au niveau des chevilles ou encore l'amour à celui… des genoux. **M. B.**

À Majorque, le plus vieil ancêtre des mammifères

PALÉONTOLOGIE Des sortes de chiens à dents de sabre, sans oreilles ni poils et qui pondaient : les gorgonopsiens étaient des prédateurs du permien, il y a entre 270 et 250 millions d'années. Les plus vieux ossements viennent d'être découverts sur l'île de Majorque (Espagne). Leur lignée évolutive donnera naissance aux premiers mammifères, 50 millions d'années plus tard. L'animal mesurant environ un mètre de long constitue le premier fossile de ce groupe retrouvé aux Baléares. **J. I.**

SOURCE : R. MATAMALES-ANDREU, MUSÉE DES SCIENCES NATURELLES DES BALÉARES, ESPAGNE.

HENRY SUTHERLAND SHARPE

Le gorgonopsien vivait il y a entre 270 et 250 millions d'années (reconstitution).

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

ÉRIC DERVAUX / HANS LUCAS / AFP - MILKO MARCHETTI - AFP APPLE TV

ENVIRONNEMENT

Les eaux usées rendent compte de notre santé

« Montrez-moi vos eaux usées, je vous dirai ce que vous mangez, ce que vous buvez, ce que vous prenez comme médicament. » Entretien avec Thomas Thiebault, de l'École pratique des hautes études-PSL, qui participe à un projet sur l'analyse des matières dans les réseaux d'assainissement. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/936eaux

PODCAST

« Sciences et Avenir » s'écoute aussi

Mythes et réalités sur les gladiateurs, les enjeux écologiques de l'IA, les fouilles de Notre-Dame : voici quelques-uns des thèmes abordés dans notre podcast Sixième science qui réunit les journalistes de *Sciences et Avenir* et Romain Gouloumès de *20 minutes*. sciav.fr/podcast

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

L'humour primé au concours de photo animalière

Le palmarès de la photographie animalière teintée d'une touche d'humour et primée par le Nikon Wildlife Comedy Photography Award. sciav.fr/936humour

5 minutes

Entretien inédit avec Paul Watson

Dans cet entretien inédit publié à l'occasion de sa libération, Paul Watson revient sur l'avènement de sa vocation pour la protection de la vie marine. sciav.fr/936watson

10 minutes

Vivre sous terre comme dans la série « Silo »

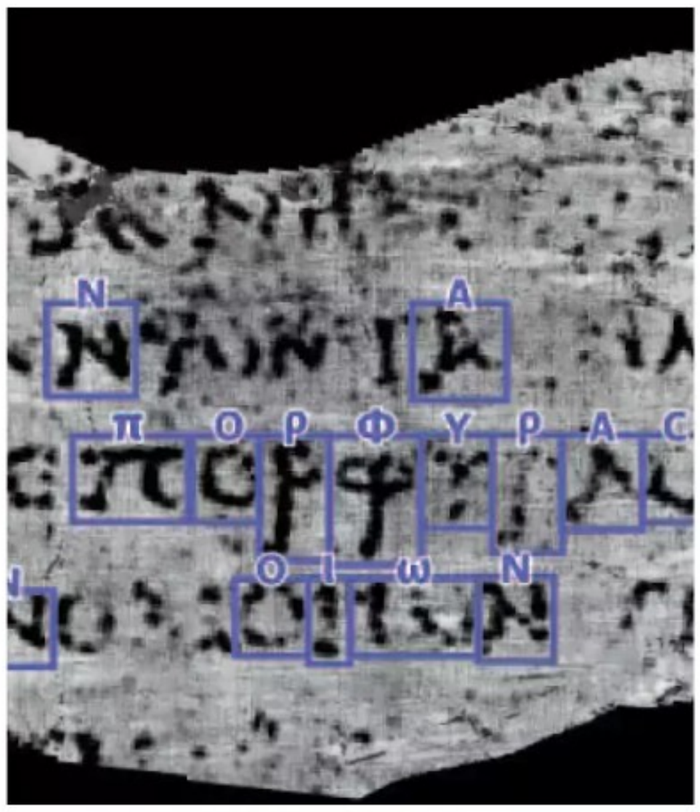
Combien de temps pourrait-on vraiment vivre sous terre sans lumière naturelle comme dans la série télévisée *Silo* ? Enquête. sciav.fr/936silo

Vous êtes plus de 2 millions à nous suivre sur Facebook

Les 10 découvertes de 2024

De la mise au point de médicaments innovants aux images d'une précision inédite du cerveau humain en passant par de nouvelles révélations sur l'histoire du cosmos, l'année écoulée a été riche en découvertes scientifiques. Voici une sélection des plus belles parues dans « Sciences et Avenir ».

Par la rédaction

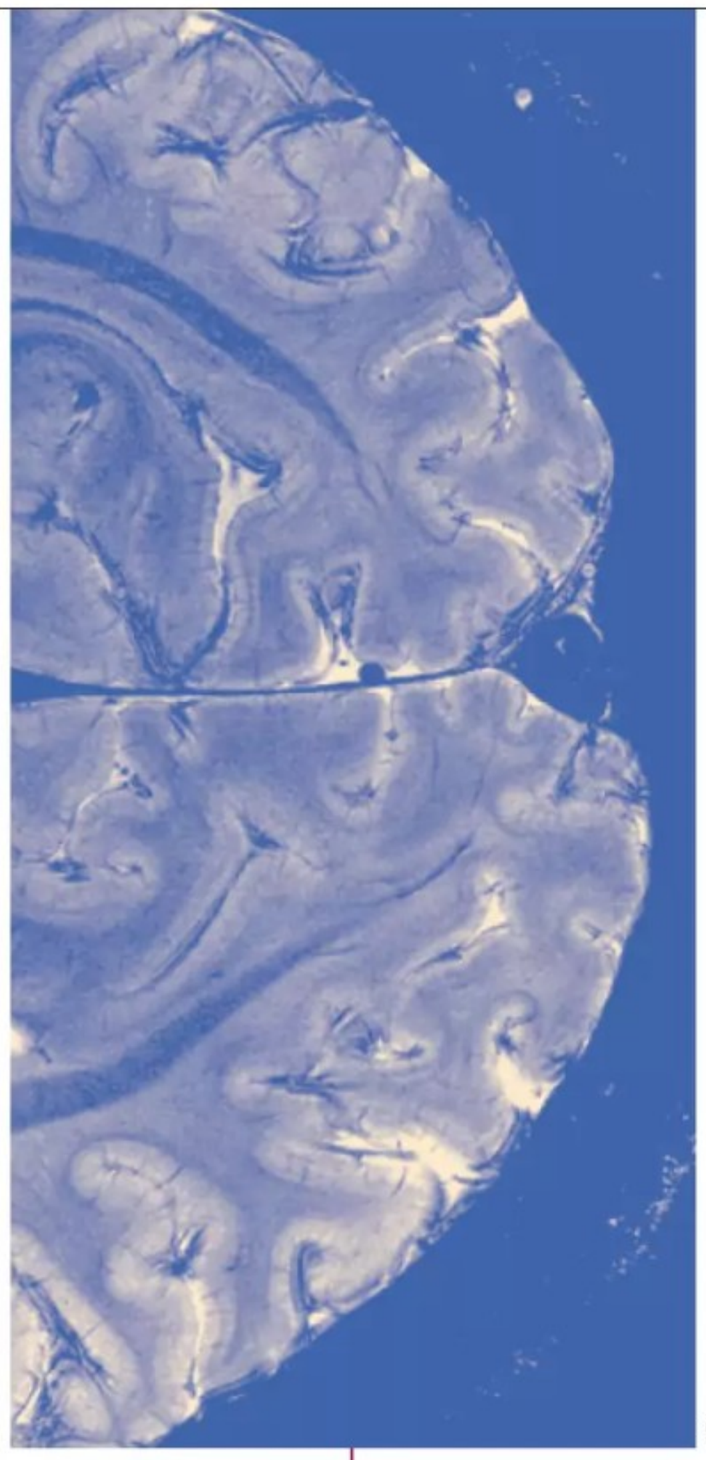


VESUVIUS CHALLENGE/EDUCELAB

5 FÉV.

L'IA DÉCRYPTE UN PAPYRUS D'HERCULANUM

D'un simple mot décrypté en octobre 2023, ce sont 15 colonnes de texte qui ont pu être lues à peine quelques semaines plus tard. Cette prouesse, réalisée grâce aux avancées considérables dans les techniques d'intelligence artificielle, a permis de révéler dans l'un des rouleaux carbonisés lors de l'éruption du Vésuve, en 79 de notre ère, un texte philosophique inconnu sur les plaisirs de la vie, jamais lu depuis près de 2000 ans. **M. B.**



CEA

ESA/EUCLID/EUCLID CONSORTIUM/NASA

CHINE NOUVELLE/SIPA

2 AVRIL

4 AVRIL

25 JUIN

LES PREMIÈRES IMAGES DE L'IRM LA PLUS PUISSANTE AU MONDE

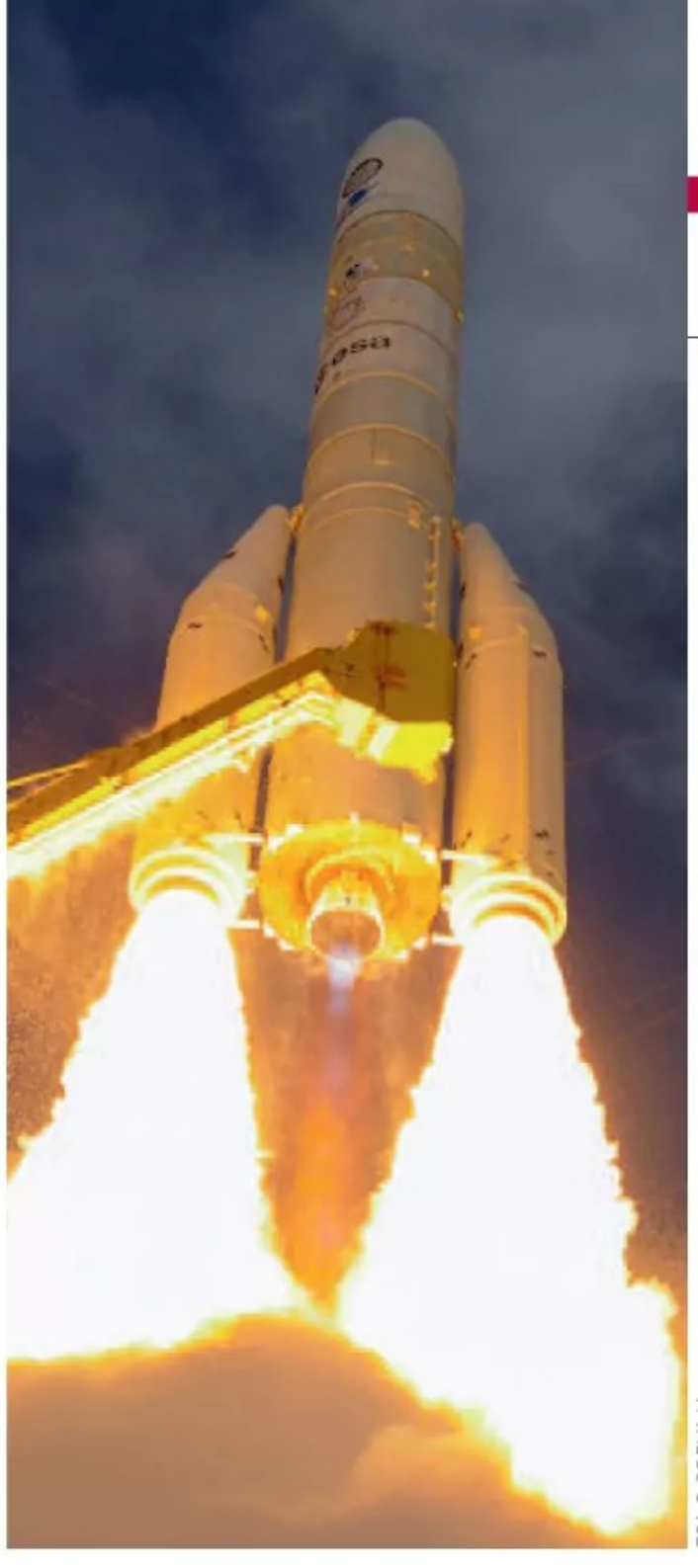
Après vingt ans de travaux, l'IRM Iseult, du centre de neuro-imagerie Neurospin à Saclay (Essonne), livre ses premiers clichés de cerveaux humains. Des images d'une précision inouïe : 0,2 millimètre dans le plan et 1 millimètre en profondeur, soit un volume équivalent à quelques milliers de neurones seulement, contre plusieurs millions avec les IRM standards. L'instrument engendre pour cela un champ magnétique record de 11,7 teslas, bien davantage que les IRM de 1,5 ou 3 teslas utilisées dans les hôpitaux. **F. D.**

L'INSAISISSABLE ÉNERGIE NOIRE A VARIÉ

La collaboration DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) publie ses premiers résultats sur l'énergie noire, grâce à la cartographie de 40 millions de galaxies et de quasars réalisée à l'observatoire de Kitt Peak (États-Unis). Les premières analyses suggèrent que l'énergie responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers aurait varié au fil du temps. DESI est complémentaire d'Euclid, le télescope spatial européen lancé en 2023, lui aussi consacré à l'étude de l'énergie noire. Il a livré ses premières images le 23 mai, révélant 11 millions d'objets visibles. **F. N.**

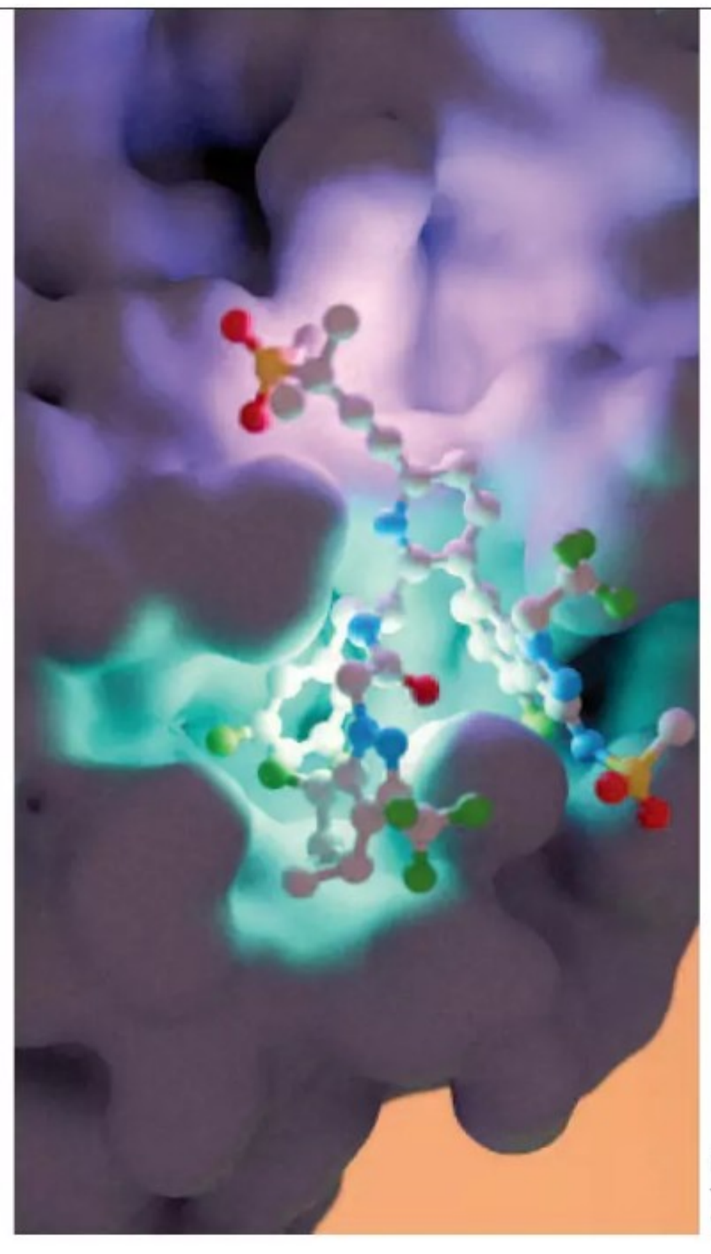
DES ÉCHANTILLONS DE LA FACE CACHÉE DE LA LUNE

La mission chinoise Chang'e 6 rapporte 1935 grammes de roches et de fines poussières prélevées sur la face cachée de la Lune, qui demeure en permanence du côté opposé à la Terre. Grâce à ce butin inédit, les planétologues espèrent comprendre pourquoi les faces visible et cachée sont si différentes, l'une apparaissant plutôt lisse et emplie de « mers lunaires » de couleur sombre, tandis que l'autre, beaucoup plus claire et couverte de hauts-reliefs, en est quasiment dépourvue. **F. D.**



ESA-S. CORVAJA

SPL/ AKG IMAGES



SPL/ AFP

9 JUIL.

SUCCÈS POUR LE LANCEMENT D'ARIANE 6

« Un jour historique pour l'ESA et l'Europe. » Ainsi s'est exprimé le directeur de l'Agence spatiale européenne Josef Aschbacher pour saluer le succès du vol inaugural d'Ariane 6 au cours duquel la fusée a placé en orbite une dizaine de microsatellites. Elle a néanmoins dévié de sa trajectoire et l'étage supérieur n'a pu rentrer dans l'atmosphère comme prévu. L'Europe ne disposait plus de lanceurs depuis le dernier vol d'Ariane 5, en juillet 2023. **M. N.**

11 JUIL.

DES CHROMOSOMES DE MAMMOUTHS INTACTS

C'est une première mondiale : le génome d'un animal disparu a été reconstitué. Une prouesse rendue possible par l'exceptionnelle conservation de deux spécimens de mammouths laineux découverts en Sibérie (Russie). Dans leurs cellules vitrifiées demeuraient des chromosomes fossiles presque intacts. Comme chez l'éléphant, ils sont au nombre de 28 avec des profils d'expression génétique assez semblables, à l'exception de certains gènes affectés au contrôle de la fourrure et de la résistance au froid. Les chromosomes glacés de ce mammouth vont désormais être examinés par de nouvelles équipes qui chercheront d'autres spécificités. **J. I.**

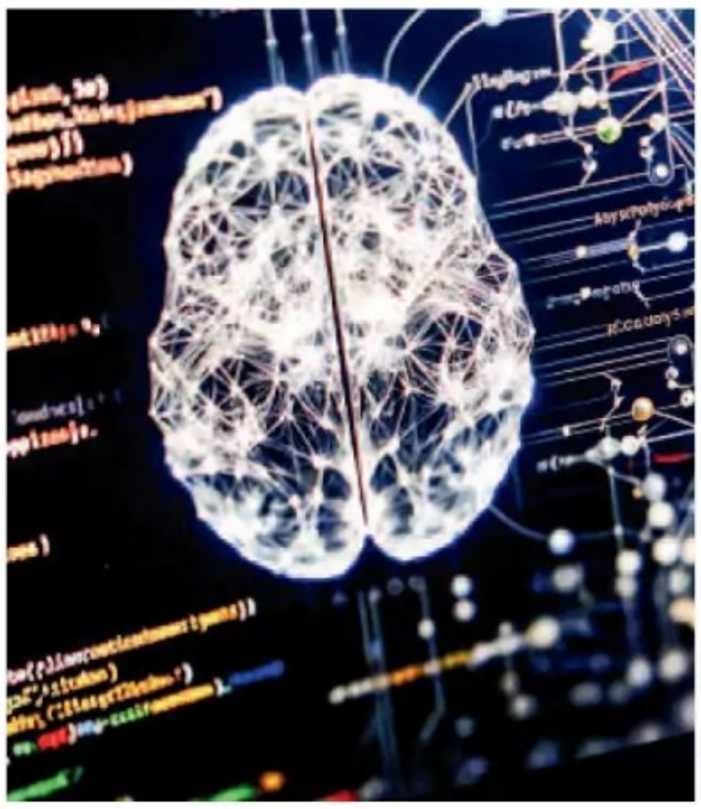
24 JUIL.

UN TRAITEMENT RÉVOLUTIONNAIRE CONTRE LE SIDA

Une efficacité de 100 % pour éviter l'infection au VIH. C'est le résultat d'un essai clinique testant une nouvelle stratégie de protection contre le sida en Afrique : le lénacapavir, un antiviral déjà utilisé chez les patients souffrant d'infections persistantes. Sur les 2134 femmes ayant reçu une injection de cette molécule, aucune n'a été infectée par le virus du sida. Sa cible ? La capside du virus, un bouclier qui protège son matériel génétique. Ce traitement préventif nécessiterait seulement deux injections par an, contre un comprimé quotidien jusqu'à présent. En décembre dernier, ces travaux ont été nommés *« découverte de l'année »* par la revue *Science*. **M. P.**

Les 10 découvertes de 2024

I. NEMCHINOVA/ ALAMY/PHOTO12



GETTY IMAGES

L. ACOSTA / AFP

8 OCT.

UNE « MOLÉCULE MIRACLE » COMBAT L'OBÉSITÉ SÉVÈRE

Un traitement de nouvelle génération contre l'obésité sévère fait son entrée dans les pharmacies françaises : le Wegovy, commercialisé par le laboratoire danois Novo Nordisk. Il fait partie des analogues du GLP-1, une classe de molécules qui a mis en effervescence la recherche biomédicale ces deux dernières années pour ses nombreux bénéfices collatéraux. Outre une réduction avérée des risques cardio-vasculaires, ces aGLP-1 pourraient profiter aux patients souffrant de maladie neurodégénérative, d'addiction, de dépression voire de cancer. Une *« molécule miracle »* décortiquée dans notre dossier spécial de septembre (*lire* S. et A. *n° 931*). **H. J.**

8 OCT.

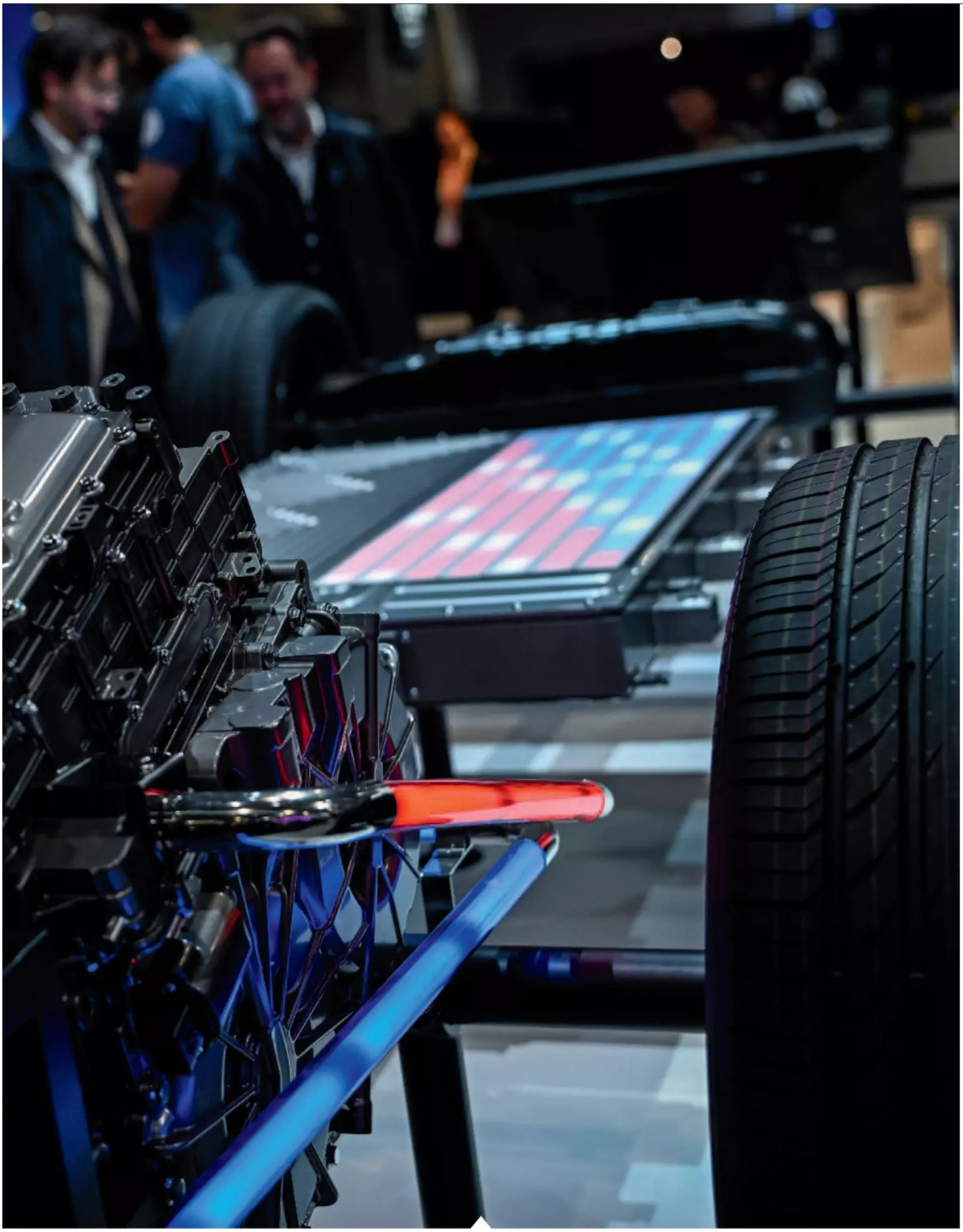
UN PRIX NOBEL POUR L'IA

Même si l'informatique n'est pas une discipline distinguée par les prix Nobel, le biophysicien John Hopfield et l'informaticien Geoffrey Hinton se voient attribuer celui de physique pour leurs travaux respectifs en intelligence artificielle (IA). Le premier est à l'origine d'un réseau de neurones pionnier, qui porte son nom. Le second a fait décoller une méthode d'entraînement pour réseau de neurones. Ces deux champs de recherche sont à l'origine de l'essor actuel de l'IA, qui repose sur l'apprentissage automatique à partir de données. **A. D.**

9 DÉC.

LE PLAFOND DE +1,5 °C EST DÉPASSÉ

La hausse de la température de la planète Terre depuis les débuts de l'ère industrielle, en 1850, a dépassé pour la première fois 1,5 °C. 2024 restera donc comme l'année où l'accord de Paris de limitation des gaz à effet de serre a été transgressé. Le monde a même connu la journée la plus chaude jamais constatée depuis le début des relevés en 1940. Le 22 juillet, la température moyenne de la planète a en effet atteint 17,15 °C. Plus touchée, la France est aujourd'hui à 1,7 °C de hausse depuis le début de l'ère industrielle. Il faudra cinq à six ans pour confirmer que l'humanité a — provisoirement ? — échoué à limiter la hausse des températures à 1,5 °C autour de 2030. **L. C.**



LIONEL GUERICOLAS / STARFACE

Au mondial de l'auto 2024, à Paris, la Plateforme automobile (PFA) avait réuni les différents acteurs industriels et organismes de recherche investissant dans la technologie des batteries, afin de promouvoir les véhicules électriques.

Batteries

La révolution à venir du « tout-solide »

Promettant une autonomie record et une sécurité accrue, la technologie « tout-solide » attire les regards, mais reste à l'état de prototype. Entre défis technologiques, coûts prohibitifs et solutions plus accessibles, l'industrie automobile cherche la clé pour démocratiser la voiture électrique en plein marasme.

Par Fabrice Nicot

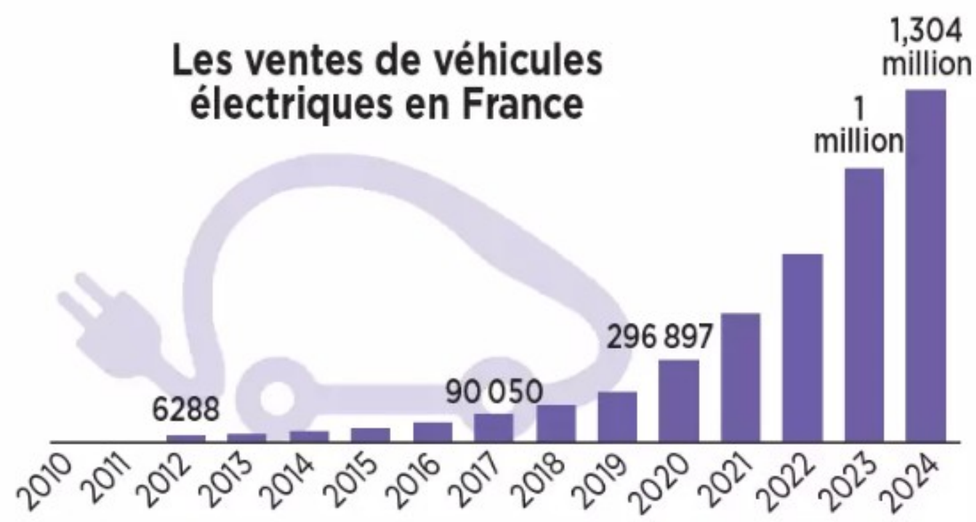
Paris, octobre 2024. Les visiteurs déambulant au Mondial de l'auto pouvaient se demander s'ils ne s'étaient pas trompés de salon, parvenus par mégarde dans celui de la batterie. Dans les vastes pavillons de la porte de Versailles, des stands faisaient la promotion enthousiaste de batteries lithium-ion « semi-solides », en attendant les modèles « tout-solide ». Des batteries dotées d'électrodes « nickel-manganèse-cobalt », « lithium-fer-phosphate »… Une véritable ode à la classification périodique. C'est à se demander s'il ne faudra pas demain un diplôme d'ingénieur chimiste pour choisir sa voiture.

Côté ventes en revanche, ce n'est pas la même effervescence. En novembre 2024, celle de véhicules neufs pour particuliers et utilitaires entièrement électriques était en baisse de 26,5 % par rapport à novembre 2023 (Source Avere-France). « *Aujourd'hui, la filière automobile a clairement le moral dans les chaussettes,* confirme sans détour Nicolas Le Bigot, directeur technique et environnement de la Plateforme automobile (PFA), qui fédère les acteurs du secteur. *L'arrêt des aides à l'achat des véhicules électriques en Allemagne fin 2023 a entraîné une brutale chute des ventes. En France, les aides sont divisées par deux en 2025, avec les mêmes conséquences. Sans subvention, les véhicules électriques resteront beaucoup plus chers que les thermiques. Or, la batterie, c'est 40 % du prix de la voiture…* »

Avec un tel poids, la batterie est une des clés pour sauver la filière. Une technologie est régulièrement mise en avant pour y parvenir : le « tout-solide ». Elle promet des batteries plus sûres, plus rapides à recharger, et dotées d'une plus grande autonomie : « *jusqu'à 1200 kilomètres, pour une recharge de 10 minutes* », claironne Toyota, qui évoque l'horizon 2027 pour une première démonstration. Stellantis (Citroën, Peugeot, Fiat…) annonce une flotte de véhicules pour 2026, également de démonstration. Plus prudent, le géant chinois BYD parle de 2029. ▸

-26,5 %

La baisse des ventes de voitures électriques neuves en novembre 2024 par rapport à novembre 2023. **À droite:** les ventes de véhicules électriques français ont connu une progression constante, entamée à partir des années 2020. (Source Avere-France)



40 %

du prix d'une voiture électrique provient des batteries.

98 %

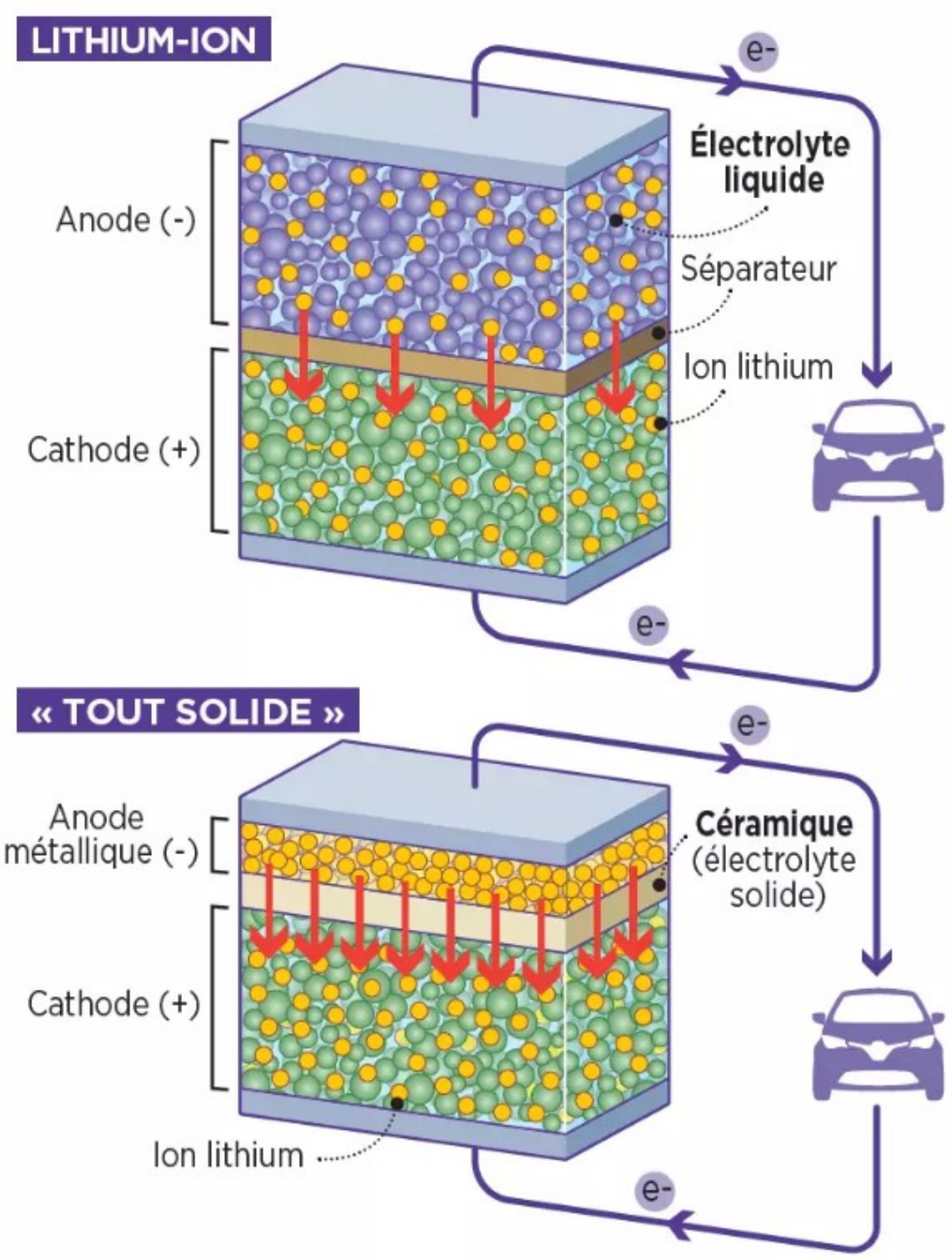
des matériaux nécessaires à la fabrication des batteries sont importés.

Une prudence que partage Sébastien Patoux, chef du service des technologies batteries au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) : *« Il est beaucoup question de cette technologie, mais rappelons que les batteries "tout-solide" n'existent pas encore. Nous n'en sommes qu'aux prototypes. Il faut donc se méfier des performances qu'on leur prête. Elles dépendront du choix des matériaux utilisés pour fabriquer ses différents éléments. »*

Quels éléments ? Ils n'ont pas changé depuis le XIXe siècle : une cathode, une anode et un électrolyte. À eux trois, ils composent une cellule. Et plusieurs cellules reliées entre elles constituent une batterie. Lors de la décharge, les ions quittent l'anode pour la cathode à travers l'électrolyte, ce qui génère en même temps un courant électrique à l'extérieur *(voir l'infographie)*. Le procédé est réversible, ce qui permet de recharger la batterie.

Batteries lithium-ion contre « tout solide »

Lors de la décharge, dans la technologie lithium-ion, les électrons passent de l'anode à la cathode par un circuit externe. Les ions de lithium quittent l'anode pour la cathode, attirés par les charges négatives des électrons et circulent à travers un électrolyte liquide. Dans le cas « tout solide », l'anode est en lithium métallique. L'électrolyte liquide est remplacé par une céramique laissant passer les ions lithium de l'anode vers la cathode. Les batteries « tout solide », plus compactes, permettent de stocker davantage d'énergie dans des conditions plus sûres notamment face au risque d'embrasement.



BRUNO BOURGEOIS

Les progrès des lithium-ion ont atteint leur plafond

Depuis les années 1990, la technologie lithium-ion règne en maître. L'utilisation de matériaux en feuillets dérivés de $LiCoO_2$ (dioxyde de cobalt et de lithium), puis d'une combinaison de cobalt, nickel et manganèse (NMC), pour fabriquer des cathodes, a permis un bond notable des capacités de ces batteries en vingt-cinq ans, en augmentant la quantité de charges électriques — des ions lithium (Li+) — disponibles. Ce progrès se mesure notamment en Wh/kg, qui représente la quantité d'énergie (wattheure) que peut fournir un kilogramme de batterie. *« Nous sommes passés de 90 Wh/kg en 1990* [pour la première génération de lithium-ion] *à 250 Wh/kg aujourd'hui en moyenne, et 300 pour les meilleures. On montera peut-être jusqu'à 400, mais nous ne sommes pas loin du plafond »*, détaille Sébastien Patoux.

En effet, si les batteries lithium-ion progressent encore un peu, c'est surtout parce que l'on améliore tout ce qu'il y a autour : la finesse des collecteurs qui permettent de récolter le courant aux bornes, la compacité des cellules afin qu'elles prennent moins de place et, surtout, l'électronique qui permet de gérer leur fonctionnement et pro-

longer leur durée de vie… Mais si l'on veut aller au-delà, il faut s'attaquer à l'anode, actuellement en graphite, et qui, contrairement à la cathode, a peu évolué depuis les années 1990.
Il faut dire que le graphite est bon marché, facile à travailler, bon conducteur d'électrons, et il permet de stocker efficacement les ions lithium dans ses pores, à la manière d'une éponge. L'alternative envisagée est une anode entièrement en lithium, délivrant plus d'ions Li+. Mais l'inconvénient de cette technique est d'engendrer des filaments métalliques (dendrites) qui se forment sur l'anode, se propagent dans l'électrolyte jusqu'à atteindre la cathode et provoquer un court-circuit, avec un risque d'incendie. « *D'où l'idée d'utiliser un électrolyte solide,* reprend Sébastien Patoux. *Avec d'un côté une anode en lithium, de l'autre une cathode NMC et entre les deux l'électrolyte solide, une barrière infranchissable qui permet de sécuriser la cellule. Sur le papier, on peut espérer atteindre les 450 Wh/kg.* »
La mise au point de ce rempart contre les dendrites est complexe, car bien que solide, il doit être malgré tout conducteur des ions lithium. « *Avec une matrice tout solide, c'est effectivement très difficile de faire circuler des ions lithium,* acquiesce Sébastien Patoux. *C'est pour cela qu'on va ajouter un peu de liquide, ou de gel. D'où les termes de batterie "semi-solide" que l'on voit émerger. Mais qu'importe que l'on soit sur du tout-solide ou du semi. La clé des batteries de nouvelle génération, c'est la possibilité d'utiliser une anode en lithium-métal en toute sécurité.* »

Le délicat passage de la paillasse à la chaîne de montage

La recherche se concentre sur trois familles de solides : les oxydes, les verres soufrés et les polymères. Le CEA travaille depuis plus de quinze ans sur les polymères, et depuis 2015 sur les verres soufrés. « *Les difficultés à résoudre sont de tous ordres,* constate Sébastien Patoux. *Par exemple, quelle géométrie doit-on donner aux cellules ?*

ENTRETIEN

JEAN-MARIE TARASCON

MÉDAILLE D'OR DU CNRS 2022, TITULAIRE DE LA CHAIRE CHIMIE DU SOLIDE ET ÉNERGIE AU COLLÈGE DE FRANCE

« Nous devons trouver des technologies disruptives »

Comment se porte le marché des batteries en France et en Europe ?
La période est complexe. Le lithium-ion reste la technologie dominante, mais l'enthousiasme suscité par les véhicules électriques faiblit. Cela s'explique par des ventes en deçà des attentes, la fin de certaines subventions et une prise de conscience de nos faiblesses structurelles.

Quelles sont ces faiblesses ?
En Europe, nous dépendons encore massivement de l'importation : près de 98 % des matériaux nécessaires à la fabrication des batteries et 97 % des machines d'assemblage viennent d'Asie. Cela rend notre industrie peu compétitive face à un pays comme la Chine qui a su intégrer et maîtriser toute la chaîne de valeur. Par ailleurs, l'Europe manque de vision stratégique à long terme. Notre politique reste défensive, focalisée sur la souveraineté, avec sur notre territoire des « gigafactories » [méga-usines] qui rencontrent des difficultés de mise en production, plutôt que l'innovation.

Quels moyens proposez-vous pour surmonter ces obstacles ?
Il faut renforcer nos investissements dans le raffinage des matériaux, la production locale d'équipements et la formation d'ingénieurs spécialisés. Les gouvernements doivent aussi garantir un marché pour les batteries produites localement. Cela pourrait prendre la forme de commandes publiques ou de quotas d'achats obligatoires pour les constructeurs.

JULIEN FAURE/LEEXTRA VIA OPALE.PHOTO

Et sur le plan de la recherche ?
L'innovation doit être au cœur de notre stratégie. La Chine tente d'imposer sa technologie LFP (lithium-fer-phosphate) qu'elle maîtrise totalement. Nous ne pourrons jamais être compétitifs face à elle. Nous devons donc trouver des technologies disruptives, plutôt que de nous épuiser à la rattraper. Et il y a des voies prometteuses, comme le lithium-soufre solide ou le sodium-ion qui pourraient concurrencer le LFP, et sur lesquelles nous sommes bien placés côté recherche. Mais pour cela, il faut davantage d'échanges entre scientifiques et industriels. C'est la clé pour développer une véritable industrie européenne des batteries. Il est encore temps de créer une structure de type « Airbus des batteries ». **Propos recueillis par F. N.**

FRANCOIS HENRY/REA

La plateforme batteries du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, à Grenoble, concentre ses recherches sur des batteries de nouvelle génération, dont les modèles « tout-solide ».

Les cellules lithium-ion sont formées de feuilles enroulées sur elles-mêmes, "spiralées". Impossible à réaliser avec des matériaux rigides. Pour le tout-solide, on s'oriente davantage vers une cellule composée de feuilles superposées : une feuille anode, une feuille électrolyte, une feuille cathode. »

« Non seulement la technologie tout-solide est à inventer, mais il faudra en plus qu'elle soit reproductible par les fabricants », complète Stéphane Levasseur, en charge de l'innovation des matériaux de batterie chez Umicore, un des leaders mondiaux des matériaux avancés, spécialisé notamment dans les batteries rechargeables. L'entreprise est à l'intersection de la recherche et des applications, collaborant à la fois avec le CEA et les constructeurs automobiles. Or, le passage de la paillasse à la chaîne de montage promet d'être délicat. Car les méthodes mises en jeu pour fabriquer des batteries découlent d'une chimie complexe, loin des travaux pratiques de physique d'antan où l'on plongeait des barreaux de cuivre et de zinc dans un électrolyte. *« Par exemple, pour faire une électrode, il faut un matériau actif qui libère ou stocke les ions lithium, un liant (un polymère) qui permet d'accrocher le matériau actif au collecteur de courant, et du noir de carbone qui agit comme un conducteur électronique,* détaille Stéphane Levasseur. *Tous ces ingrédients sont mélangés pour former une encre, qui est ensuite déposée sur une feuille d'aluminium puis séchée. »*

Avec les batteries tout-solide, la difficulté consiste notamment à optimiser la surface de contact entre le matériau actif dans l'électrode et l'électrolyte, afin de pouvoir faire voyager les ions lithium plus efficacement dans la batterie. *« Actuellement, vous plongez votre électrode dans l'électrolyte liquide*

MATÉRIAUX

Peu de terres rares, mais beaucoup de lithium

La voiture électrique contient quelques terres rares (qui ne sont pas des « terres » mais des métaux, et ne sont pas rares), comme le néodyme ou le dysprosium. On les retrouve, mais pas systématiquement, dans les aimants permanents des moteurs électriques, où ils améliorent l'efficacité et réduisent la taille des moteurs. Mais, contrairement à une idée reçue, les batteries n'en contiennent plus depuis l'avènement de la technologie lithium-ion. *« Il faut de 6,5 à 8 kg de lithium métal pour une berline moyenne »*, estime Stéphane Levasseur, en charge de l'innovation des matériaux de batterie chez Umicore. Les grands producteurs sont l'Australie, l'Argentine, la Bolivie, le Chili et la Chine. L'Europe dispose de plusieurs gisements prometteurs (Portugal, République tchèque, France…), mais elle importe encore l'essentiel de son lithium, dont l'extraction peut engendrer des pollutions des sols et des eaux significatives.

et celui-ci se répand partout, donc le problème de la surface de contact ne se pose pas, explique le spécialiste. *Ça ne marchera pas comme ça avec un électrolyte solide. Or, l'interface entre l'électrode et l'électrolyte est cruciale pour de bonnes performances. La recherche se concentre donc sur cet aspect, et nous devrons trouver des solutions compatibles avec une production de masse.* » Si cela constitue toujours un verrou technologique à lever, l'obstacle ne fait pas reculer Umicore, dont le centre de recherche comporte 80 chercheurs dévolus aux batteries tout-solide. L'entreprise envisage une phase de test dès 2027-2029, *« sur une flotte limitée de véhicules, afin de valider le concept, avant une production à grande échelle vers 2032-2035* », selon Stéphane Levasseur.

L'essor des batteries LFP, peu chères, pour relancer les ventes

Il reste que même si la batterie tout-solide tient ses promesses, elle demeurera pour longtemps un équipement de luxe. Cela convaincra peut-être les plus aisés de passer à l'électrique, mais *quid* de la majorité des usagers qui ne souhaitent pas, ou ne peuvent pas, investir 45 000 euros dans une voiture. Pour Sébastien Patoux, il importe donc de ne pas se focaliser sur une technologie, mais d'en envisager d'autres, moins coûteuses. *« L'une d'entre elles, qui se développe rapidement depuis deux ans, consiste à remplacer les cathodes NMC par des LFP* [lithium-fer-phosphate] *ou LMFP* [lithium-fer-manganèse-phosphate]. *Le LFP a été découvert aux États-Unis en 1996, puis abandonné car ses performances étaient trop décevantes. La Chine a récupéré le concept en 2015 et l'a amélioré à tel point qu'aujourd'hui, il fait presque jeu égal avec le NMC. Et il coûte moins cher.* »

En septembre 2024, une batterie LFP revenait à 59 dollars par kilowattheure (kWh), en baisse constante entretenue par une surproduction chinoise, contre 68,90 dollars pour les NMC, un prix bien plus volatil car lié aux cours du cobalt et du nickel, qui peuvent s'envoler facilement. Les fabricants chinois, BYD en tête, les utilisent déjà largement. Tesla en équipe ses modèles d'entrée de gamme. Stellantis se lance également. *« Le développement de batteries moins chères mais moins performantes* [comme les batteries LFP] *semble être une piste à court et moyen termes pour diffuser davantage la voiture électrique, en attendant l'arrivée de technologies plus avancées comme les batteries tout-solide* », confirme Nicolas Le Bigot, qui estime malgré tout que les aides à l'achat demeurent indispensables… ■

FRANCK ARDITO / CEA

« La clé des batteries de nouvelle génération, c'est la possibilité d'utiliser une anode en lithium-métal en toute sécurité »

Sébastien Patoux, chef du service des technologies batteries au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

INDUSTRIE

La batterie à la française démarre

Bonne nouvelle : le fabricant franco-allemand de batteries ACC (Automotive Cells Company) obtenait mi-décembre un prêt de 850 millions d'euros pour développer sa production en France. Ses deux coactionnaires (avec TotalEnergies) Stellantis et Mercedes ont apporté leur garantie. Symbole de l'Airbus des batteries censé concurrencer le monopole asiatique, ACC reste toutefois un lilliputien. Il vient de démarrer la production en petite série de batteries à Douvrin (Pas-de-Calais). Mais la fabrication de l'année 2024 n'équipe que 2000 à 2500 véhicules de marque Opel et Peugeot à peine. En 2030, le site tricolore pourrait arriver à 40 gigawattheures de capacité. Mais à peine ACC vient-il de commencer ses batteries classiques dites NMC (nickel-manganèse-cobalt) que ses deux actionnaires réclament des batteries LFP (lithium-fer-phosphate), moins chères. ACC en étudie la faisabilité. En attendant, il a gelé la construction de deux « gigafactories » (méga-usines) supplémentaires en Allemagne et en Italie.

DENIS CHARLET / AFP

L'européen ACC a démarré sa production dans le Pas-de-Calais, au sein de la future « vallée de la batterie ».

Alain-Gabriel Verdevoye, Challenges

Les obélisques, des virus d'un genre nouveau

Une nouvelle classe d'entités biologiques a été découverte à l'intérieur des bactéries des microbiomes humains. Leur rôle et leur mode d'action sont encore totalement énigmatiques.

Décidément, notre organisme est vraiment une *terra incognita*. En novembre 2024, une équipe de chercheurs américains de l'université Stanford a publié dans le magazine *Cell* une stupéfiante découverte : une toute nouvelle classe d'entités biologiques pullule à l'intérieur des bactéries des microbiomes humains. Inconnus jusque-là, ces éléments ont été nommés « obélisques » (*Obelisks*) en raison de leurs formes oblongues. Et ils sont loin d'être rares : les chercheurs les ont détectés dans environ 10 % des échantillons d'intestins humains étudiés et dans plus de 50 % des échantillons oraux ! En tout, leurs investigations ont mis au jour près de 30 000 obélisques différents, parmi les 5,4 millions de données génétiques publiées qu'ils ont examinées.

Formellement, les obélisques ressemblent aux viroïdes, des agents pathogènes de plantes découverts en 1971 sur des pommes de terre atteintes de la maladie des tubercules fusiformes. Ils se transmettent de cellule à cellule et de plante à plante par des mécanismes pas totalement élucidés. Comme eux, ils sont constitués uniquement d'une molécule d'ARN fermée sur elle-même et aplatie comme une tige, et ne comportent pas d'enveloppe comme les virus classiques. Seulement, là où un viroïde compte de 200 à 400 nucléotides — les éléments constitutifs de l'ARN et de l'ADN —, un obélisque est trois fois plus grand. Surtout, alors que le génome du viroïde d'une plante ne sert à fabriquer aucune protéine, celui des obélisques présente des séquences codant des protéines mystérieuses et jamais rencontrées auparavant, que les chercheurs ont nommées « oblins ». « *Leur rôle demeure totalement inconnu pour le moment,* témoigne Sébastien Pfeffer, directeur de recherche CNRS à l'université de Strasbourg. *L'une des premières choses à préciser serait justement de savoir si les séquences des "oblins" sont effectivement traduites et exprimées en protéines. Pour cela, il va être nécessaire de mettre au point des anticorps et de les diriger contre ces séquences afin d'en savoir un peu plus.* »

L'ARN est souvent présenté schématiquement comme un *alter ego* de l'ADN, la molécule en double hélice. Cette dernière, présente dans les cellules du corps humain, contient l'intégralité du matériel génétique qui fait de nous ce que nous

Une place à part dans le vivant

Parmi les formes de vie microbienne, les obélisques occupent une place intermédiaire. Ils sont à la fois proches des viroïdes de plantes par leur absence d'enveloppe, mais également proches des virus à ARN puisqu'ils codent *a priori* des protéines. Toutefois, leur taille médiane entre ces deux classes de microbes et le fait qu'on ignore tout de leurs implications sur leurs hôtes ainsi que sur l'identité et la fonction des protéines qu'ils fabriquent en font des entités à part totalement énigmatiques.

	Obélisques	Viroïdes	Virus à ARN
Génome	ARN	ARN	ARN
Taille du génome en nucléotides	1000	De 200 à 400	De 3500 à 27 000
Enveloppe	Non	Non	Oui
Codage de protéines	Oui	Non	Oui

TOM LEACH / SPL / SUCRÉ SALÉ

De forme oblongue, les obélisques sont des ARN circulaires qui codent une famille inconnue de protéines nommées par les chercheurs « oblins » (illustration).

sommes. Dans ce cadre, l'ARN apparaît comme une molécule transitoire entre l'ADN et les protéines. Elle en est très proche chimiquement, dans une version apparemment simpliste d'un enchaînement linéaire de nucléotides.

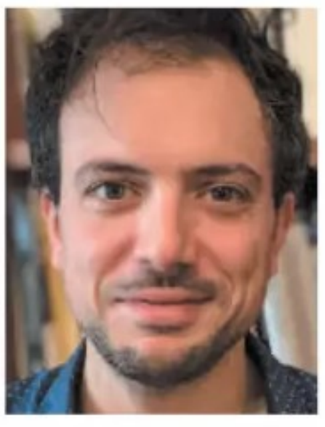
Mais, l'ARN est beaucoup plus que cela. Au moins 200 virus pathogènes connus, dont Ebola, la grippe ou le Covid-19, ont des génomes uniquement constitués de cette molécule. D'un point de vue évolutif, certains éléments laissent ainsi à penser que l'ARN serait apparu avant l'ADN en tant que molécule porteuse d'information génétique. *« Les obélisques confortent cette hypothèse »*, avance Sébastien Pfeffer. Étant donné qu'elles ne ressemblent à rien de connu, ces entités pourraient être très anciennes et constituer les vestiges d'éléments qui ont depuis disparu. *« Quant à leur rôle, on peut imaginer que les obélisques confèrent aux bactéries qui en contiennent un avantage par rapport aux autres,* propose le chercheur. *Par exemple, chez la levure* Saccharomyces cerevisiae, *il existe un virus qui fabrique une toxine pouvant infecter et tuer les levures environnantes dépourvues de ce virus. »*

Karim Majzoub, de l'Institut de génétique moléculaire de Montpellier (CNRS) est en train d'écrire une revue, avec le prix Nobel 2006 Andrew Fire et les autres auteurs de la découverte des obélisques, concernant le panthéon des ARN circulaires présents chez les espèces vivantes, des plantes aux bactéries, en passant par les champignons et les animaux. *« Mon laboratoire travaille notamment sur un petit ARN circulaire qui provoque l'hépatite D chez l'être humain. Or, quand ce sous-virus satellite est présent avec le virus de l'hépatite B, la maladie qu'ils provoquent à eux deux est beaucoup plus sévère. C'est pourquoi, savoir si les obélisques constituent des agents infectieux et un danger pour la santé humaine est l'une des questions les plus immédiates à laquelle il faut répondre. »*

Un champ de recherche entièrement vierge

Les obélisques viennent d'ouvrir un champ de recherche entièrement vierge et suscitent quantité d'interrogations. L'article de *Cell* se conclut en listant une vingtaine de questions concernant ces entités biologiques. Sont-elles nuisibles ou, au contraire, protègent-elles les organismes qu'elles habitent ? Comment se répliquent-elles ? Quel est leur mode de propagation ? Est-ce que l'abondance et la variété des obélisques au sein d'un organisme sont prédictives de sa bonne ou de sa mauvaise santé ? Ou encore : quel est le rôle de ces éléments parasites ? À supposer d'ailleurs qu'ils en ont ! *« Nous avons tendance à avoir une vision très anthropocentrique de ce type d'éléments,* estime Karim Majzoub. *S'ils sont là, ce serait forcément pour une raison. Mais ces éléments parasites que sont les obélisques n'ont pas nécessairement une fonction pour les bactéries et les organismes qu'ils occupent. Ils peuvent n'avoir de fonction que pour eux-mêmes, se multiplier et se transmettre, répondant ainsi à la définition première d'un virus… »* ■

Hervé Ratel



KARIM MAJZOUB

« Savoir si les obélisques sont des agents infectieux est l'une des questions les plus immédiates à laquelle il faut répondre »

Karim Majzoub, virologue à l'Institut de génétique moléculaire de Montpellier (CNRS)

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

Quand les algorithmes doivent désapprendre

Les performances actuelles des modèles d'intelligence artificielle soulèvent des problèmes de confidentialité, de vie privée, de droit d'auteur. Des travaux cherchent à leur faire « oublier » certaines données d'entraînement.

Début janvier 2024, Gary Marcus, professeur émérite de l'université de New York (États-Unis), spécialiste d'intelligence artificielle, et Reid Southen, illustrateur pour les studios de cinéma, signaient un article pour *IEEE Spectrum* incluant des images tirées de films de super-héros, du dessin animé *Les Simpsons*, du jeu vidéo The Last of Us 2 ou encore d'épisodes de la saga *La Guerre des étoiles*. Ils ne les ont pas trouvées sur Internet, n'ont pas fait de capture d'écran : ils les ont générées avec Midjourney et Dall-E 3, par le biais d'instructions en langage naturel (*prompts*). Ce type d'outils filtre parfois les prompts contenant un terme relatif à un contenu soumis au droit d'auteur (nom de personnage ou d'acteur, titre de film). Mais il est possible de contourner la contrainte. Les deux auteurs ont ainsi obtenu des images de *La Guerre des étoiles* ou du jeu Super Mario sans utiliser ces mots-clefs mais avec des périphrases. Un an auparavant, une équipe de chercheurs de Google, de l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse) et des universités américaines de Berkeley et de Princeton avait généré des logos de marques et des photos de célébrités avec Stable Diffusion et Imagen (Google). Le *New York Times*, lui, a inclus dans

3226
images pédopornographiques ont été trouvées en 2023 dans la base Laion-5B, utilisée pour entraîner des modèles de génération d'images.

une plainte pour plagiat déposée fin 2023 contre OpenAI des extraits de ses articles reproduits mot pour mot par ChatGPT.
Le problème est double : non seulement ces contenus ne devraient pas être produits, mais le fait qu'ils le soient prouve qu'ils figurent dans les bases de données d'entraînement. Ces algorithmes sont en effet entraînés sur d'énormes volumes de données collectées à la volée sur Internet. Articles, discussions de forum, pages Wikipédia, livres, photos, vidéos, etc. Une pratique loin d'être transparente et soulevant des problèmes juridiques. D'où le développement d'une discipline appelée « désapprentissage machine ». Autrement dit, faire en sorte qu'un algorithme « oublie » une partie de ce qu'il a appris.

Trop long de repartir de zéro

« *Ces recherches sont motivées par la tendance des nouveaux modèles d'intelligence artificielle à l'apprentissage par cœur des données d'entraînement,* explique Martin Van Waerebeke, doctorant sur le sujet à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). *Cela peut poser des problèmes de sécurité, de confidentialité, avoir des impacts sur la vie privée.* »
En Europe, la question est devenue particulièrement sensible avec la notion de droit à l'oubli et le règlement général sur la protection des données (RGPD) de 2016 (*lire ci-dessus*). Or, les algorithmes d'apprentissage à base de réseaux de neurones sont si complexes que leurs concepteurs ne savent pas vraiment ce qu'ils apprennent ni de quelle façon. Difficile, dans ces conditions, de savoir comment faire oublier des données, à part pour des modèles très simples.
L'enjeu n'est pas de supprimer un contenu du corpus d'entraînement, mais plutôt de supprimer des connexions entre les neurones artificiels qui ont le plus pesé dans l'apprentissage des caractéristiques d'une donnée. Refaire de zéro un corpus d'entraînement et entraîner à nouveau l'algorithme serait trop long et compliqué. Plusieurs autres approches ont déjà émergé. Par exemple, réentraîner l'algorithme s eulement sur les données originelles qu'il ne faut ne pas oublier, afin de noyer l'impact des données litigieuses.

> “ Ces recherches sont motivées par la tendance des nouveaux modèles d'intelligence artificielle à l'apprentissage par cœur des données d'entraînement ”
> **Martin Van Waerebeke,** doctorant en désapprentissage machine à l'Inria

Ou modifier les paramètres internes de l'algorithme, mais pas la structure de ce dernier. Ou encore concevoir d'emblée l'algorithme de manière qu'il puisse désapprendre facilement.
Entre juin et septembre 2023, Google a organisé un concours, le premier du genre, invitant des développeurs à soumettre leurs solutions de désapprentissage, afin de les comparer et les évaluer. « *Il n'existe pour l'heure aucun processus de test standardisé, contrairement à l'anonymisation des données, où des procédures existent* », note Marco Lorenzi, spécialiste d'analyse de données et d'apprentissage automatique à l'Inria. Une chose est sûre : le besoin est là. Le désapprentissage peut même faciliter des travaux de recherche, comme en médecine, quand plusieurs hôpitaux collaborent en apportant chacun leurs données. « *Cela peut inciter un établissement à participer s'il sait qu'à tout moment, il peut se désengager et que ses données peuvent être oubliées* », ajoute Marco Lorenzi. L'approche peut aussi faire « oublier » des données incompatibles avec d'autres, de mauvaise qualité, non normées, etc. Reste à définir comment. Si, encore, cela s'avère possible… ■

Arnaud Devillard

POUR EN SAVOIR PLUS

La compétition de Google sur le désapprentissage (en anglais) : **sciav.fr/936defi**

LE MOT DU MOIS

Droit à l'oubli numérique

La notion de droit à l'oubli numérique (ou à l'effacement) émerge au milieu des années 1990, quand l'Union européenne souhaite mieux encadrer le traitement et la protection des données personnelles. Il s'agit de permettre à une personne de demander la suppression de données la concernant sur un site Internet ou l'arrêt du référencement de certaines pages par un moteur de recherche. L'article 17 du règlement général sur la protection des données (RGPD) renforce ce droit, détaillant les obligations incombant au responsable d'un traitement de données personnelles. Ces dispositions peuvent en théorie s'appliquer au responsable d'un système d'IA, qui aurait entraîné sa technologie sur des données collectées illégalement, erronées ou qui ne s'avèrent pas ou plus pertinentes quant à la finalité de l'outil. En pratique, c'est pour l'heure difficile.

Baleines

Comment éviter les collisions

Limitation de la vitesse des navires, déplacement des routes maritimes, création de zones de protection, nouvelles technologies faisant appel à l'intelligence artificielle… les solutions se multiplient pour éviter les accidents avec les cétacés, devenus première cause de mort non naturelle chez ces espèces vulnérables.

Par Sylvie Rouat

► **L'intensification du trafic maritime mondial** menace les baleines de disparition dans de nombreuses régions océaniques.

Les scientifiques l'avaient surnommé Julio. Ce jeune cachalot d'environ 15 mètres de long a été tué le 26 juillet 2024 dans une collision avec un navire dans le détroit de Gibraltar. Les chercheurs du centre d'observation des baleines Circe (Conservation, information et recherche sur les cétacés), qui l'ont découvert avec une plaie béante, connaissaient depuis plus de dix ans l'animal, observé en parfaite santé la veille encore. Estimée à environ 1000 individus, la population des cachalots en Méditerranée est classée en voie de disparition. D'après les études réalisées par le Circe, au moins cinq cachalots y ont trouvé la mort ces dernières années lors de collisions avec des navires. Les cachalots migrent périodiquement par le détroit de Gibraltar pour s'y nourrir et rejoindre des eaux plus chaudes et calmes, propices à la reproduction et à l'élevage des jeunes. Mais ce même détroit voit passer près de 300 navires chaque jour, soit environ 100 000 navires par an, qui transportent 50 % de produits pétroliers et 40 % de gaz consommés par les Européens.

Ce schéma de superposition des autoroutes maritimes sur les lieux de vie des baleines se retrouve hélas dans de nombreuses régions océaniques, et la problématique des collisions avec les cétacés est devenue l'une des premières causes de mort non naturelle et de réduction drastique de leur espérance de vie, donc de reproduction. L'avenir s'annonce sombre : la croissance des échanges mondiaux s'accompagne d'une intensification du trafic maritime. Et ce, alors que « *six espèces de baleines sur 13 sont classées en danger d'extinction ou vulnérables,* souligne Emma Heslop, océanographe à la commission océanographique intergouvernementale de l'Unesco. *Et maintenant que la banquise fond en Arctique, les bateaux passent dans des endroits où les baleines boréales se reproduisent.* »

6 sur 13

Le nombre d'espèces de baleines classées en danger d'extinction ou vulnérables.

(SOURCE : COMMISSION OCÉANOGRAPHIQUE INTERGOUVERNEMENTALE DE L'UNESCO.)

Or, les baleines jouent un rôle crucial dans l'écosystème océanique. En 2021, une étude publiée dans *Nature* par des chercheurs américains de l'université Stanford a montré que la disparition d'environ 1,5 million de baleines à fanons tuées entre 1910 et 1970 autour de l'Antarctique a entraîné une diminution du krill, malgré l'absence de leurs prédatrices. En effet, en se nourrissant dans les eaux profondes riches en nutriments et en défléquant près de la surface, elles fertilisent ces eaux avec le fer de leurs excréments et favorisent ainsi la croissance du ▸

SYLVAIN CORDIER/ GETTY IMAGES

phytoplancton, dont se repaît le krill et de nombreux autres organismes marins. Et lorsqu'elles meurent et sombrent dans les profondeurs, leurs carcasses deviennent source de nourriture dans un environnement pauvre en nutriments.
En mer, le bruit à basse fréquence des moteurs est très difficile à localiser, pour les baleines comme pour les humains. La détection des sous-marins ennemis a ainsi nécessité de développer de nombreuses technologies, à l'instar des sonars et autres réseaux d'hydrophones fixes. Le phénomène de « cône d'ombre acoustique » rend cette détection difficile, voire impossible : le moteur étant fixé à l'arrière du bateau, la masse de celui-ci bloque ou dévie la propagation des ondes sonores. Cela crée une région sous le navire où les sons provenant de l'extérieur ou de l'intérieur du bateau sont considérablement atténués, voire totalement absents. La baleine ne peut de ce fait anticiper l'arrivée d'un bateau. Or, à l'heure où le commerce mondial explose, réduire le temps de livraison est devenu un atout de vente et les navires voyagent de plus en plus rapidement, certains d'entre eux poussant leurs moteurs pour atteindre 35 nœuds (environ 65 km/h). La force d'impact lors d'une collision avec une baleine est alors beaucoup plus grande, ce qui augmente le risque de blessures graves ou de décès pour l'animal.
Pour tenter de sauvegarder les populations de baleines, la solution la plus simple consiste à réduire la vitesse des bateaux à 10 nœuds (environ 18 km/h). L'énergie cinétique du bateau est diminuée, ce qui réduit la gravité des blessures en cas de collision. Surtout, cela laisse plus de temps aux équipages pour repérer les baleines et les éviter. Une telle limitation a été imposée par le gouvernement canadien dans le golfe du Saint-Laurent après la découverte de cadavres de baleines franches de l'Atlantique Nord (*Eubalaena glacialis*), une espèce classée comme « en danger critique d'extinction ». En 2022, le consortium de recherche sur les baleines franches de l'Atlantique estimait qu'il ne restait qu'environ 340 individus, dont seulement 70 femelles reproductrices. Leur espérance de vie est passée de 70 à 35 ans.

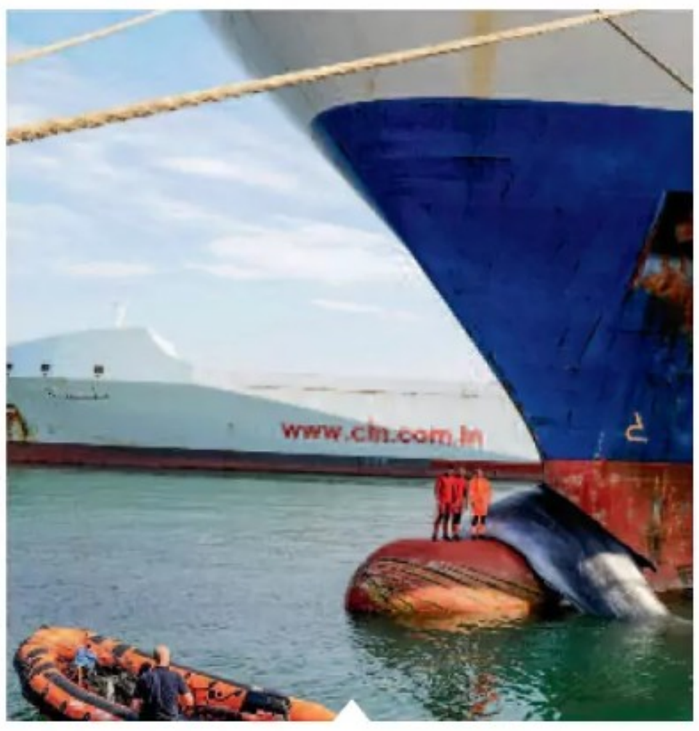
WWF

« Il faut équiper les bateaux de systèmes acoustiques performants pour détecter les cétacés »

Théa Jacob, chargée de programme Espèces marines et pêche durable au WWF, à Marseille

Des limitations de vitesse en mer non respectées

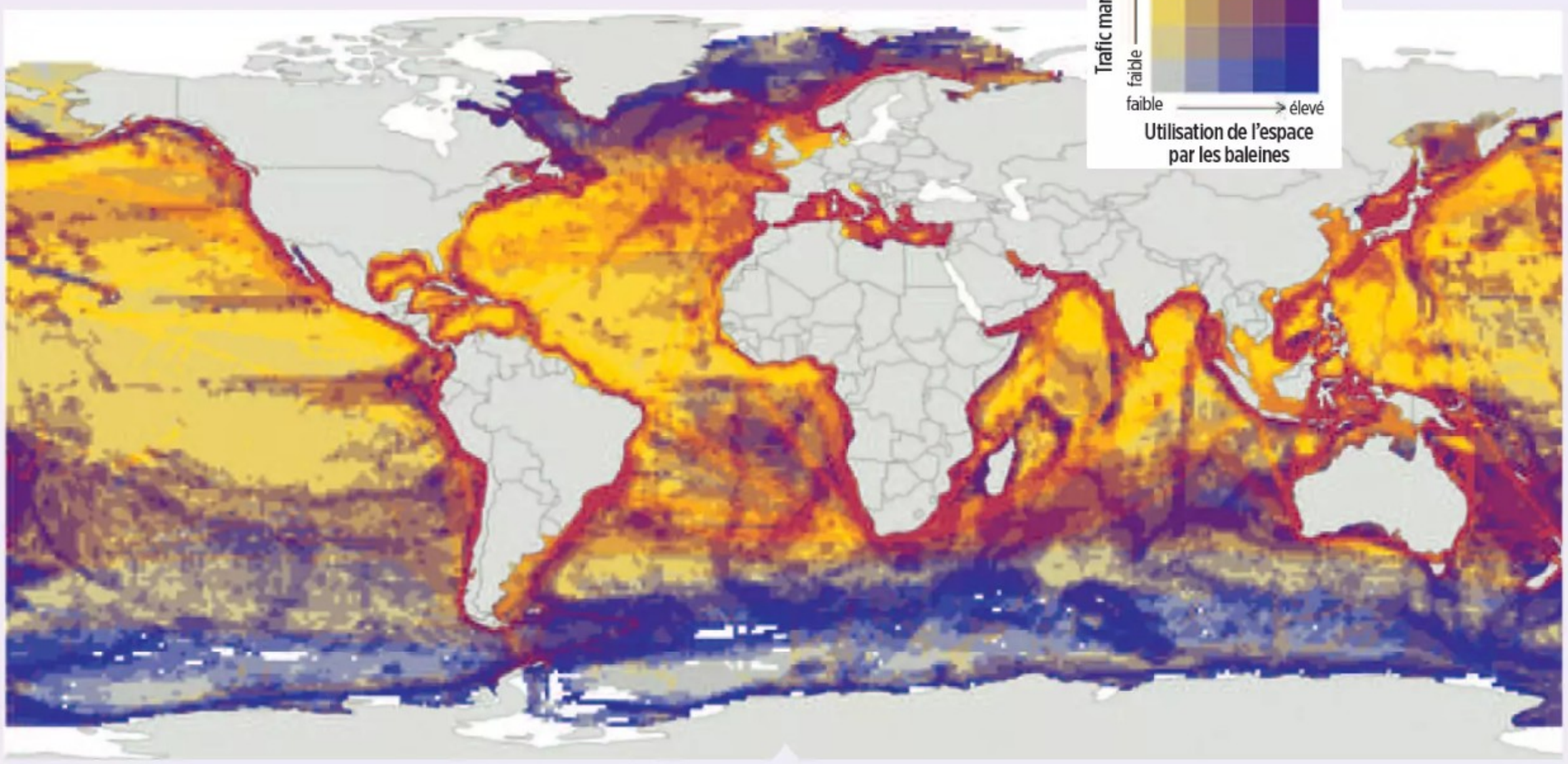
La réduction de la vitesse à 10 nœuds a aussi été instaurée dans le sanctuaire Pelagos, une zone maritime protégée qui s'étend entre la France, Monaco et l'Italie afin de protéger notamment des rorquals communs — deuxième plus grande baleine au monde —, des cachalots, des familles de globicéphales noirs, diverses espèces de dauphins et le phoque moine, l'une des espèces les plus menacées de la Méditerranée. Or cette mer concentre aussi 25 % du trafic maritime mondial et, en période estivale, le trafic touristique entre la Corse et le continent s'effectue à 85 % par voie maritime.



C. SOLLIER/LA PROVENCE/MAXPPP

En Méditerranée, mer très fréquentée, les collisions ne sont pas rares (ici une baleine percutée par un cargo découverte coincée à la proue à son arrivée à Marseille).

Depuis 2017, les bateaux battant pavillon français ont l'obligation d'avoir à bord un système de repérage en temps réel des cétacés — le système de navigation Repcet ou son équivalent. Il permet de signaler toute observation de cétacés, transmise à une base de données centralisée, qui la rediffuse à tous les autres navires utilisant le système dans la zone concernée afin qu'ils abaissent leur vitesse ou se déroutent. Cependant, *« les bateaux ne changent ni leur vitesse ni leur route,* déplore Théa Jacob, chargée de programme Espèces marines et pêche durable au WWF, à Marseille. *Notamment parce qu'un cargo naviguant d'Asie en Europe fonctionne essentiellement avec un pilote automatique et à vitesse constante. Aussi, par souci d'efficacité, nous avons changé notre fusil d'épaule et lancé le chantier des zones maritimes particulièrement vulnérables (ZMPV).* » Ce dispositif vise à protéger des sites et écosystèmes qui, en raison de leur importance écologique, socio-économique, culturelle ou scientifique, sont menacés par les impacts des activités humaines, notamment du trafic maritime.
À ce jour, l'Organisation maritime internationale (OMI) a identifié 16 ZMPV pour lesquelles ont été prises des mesures de protection restrictives. La première d'entre elles fut, en 1990, la Grande Barrière de corail australienne, à laquelle ont été adjoints par la suite le détroit de Torrès et la partie sud-ouest de la mer de Corail. D'autres lieux emblématiques, tels que l'île de Malpelo en Colombie (2002) ou les cayes de Floride, aux États-Unis, bénéficient d'une protection. Le 7 juillet 2023, l'OMI



SCIENCE

Seuls les océans Arctique et Antarctique sont (presque) dénués de risques de collision entre navires et baleines.

CARTOGRAPHIE

De plus en plus de régions maritimes à risque

Pour la première fois, fin novembre 2024, une équipe de chercheurs de l'université de Californie à Santa Barbara (États-Unis) a cartographié les zones de l'océan où les rencontres sont les plus probables. Ce travail publié dans *Science* montre que les mesures de protection sont quasiment inexistantes dans la plupart des « points chauds », où l'intensité du trafic maritime croise une densité importante d'animaux. Pour établir leur carte, les chercheurs ont utilisé plus de 35 milliards de points de position de 176 000 navires. Les bateaux (à l'exception des illégaux) sont en effet désormais tous dotés d'un système automatique d'identification. En parallèle, ils ont cartographié les routes migratoires de quatre mammifères marins : la baleine bleue *Balænoptera musculus*, le rorqual commun *Balænoptera physalus*, la baleine à bosse *Megaptera novaeangliae* et le cachalot *hyseter macrocephalus*. Pour ce faire, ils ont exploité 435 370 enregistrements de présence provenant de centaines de bases de données. Leur travail a fait apparaître des régions qui n'étaient pas considérées auparavant comme des lieux de collision : la zone des Açores (l'une des rares en haute mer), les régions côtières du Brésil, de l'Argentine, du Chili et du Pérou, les littoraux d'Afrique du Sud, du Mozambique et de Madagascar. Seuls les océans Arctique et Antarctique sont dénués — ou presque — de risques. 19 % de ces zones affectent au moins deux espèces, et moins de 5 % concernent trois espèces. Une possible bonne nouvelle : les régions maritimes à risque ne représentent que 2,6 % de la surface des océans et sont principalement situées dans les zones économiques exclusives (ZEE). Or, celles-ci sont sous la responsabilité des États, qui peuvent donc imposer des mesures de protection. À ce jour, moins de 7 % en bénéficient. ■

Loïc Chauveau

a acté la création d'une telle zone au nord-ouest de la mer Méditerranée. Cela implique de définir des corridors de circulation des bateaux, matérialisés notamment par des balises acoustiques. Hélas, les associations n'ont pas réussi à imposer la réduction de vitesse obligatoire, « *car cela bouscule le modèle économique des cargos et des navires-citernes* », constate Ludovic Frère Escoffier, responsable du programme Vie des océans chez WWF France. Pour les ferrys, qui desservent notamment la Corse, « *il faut mettre en place des couloirs à haute vitesse,* explique Théa Jacob, *et équiper les bateaux de systèmes acoustiques performants pour détecter les cétacés, qui les localiseront précisément par triangulation. Mais ce n'est pas encore au point.* »

Le tourisme, autre fléau pour les mammifères marins

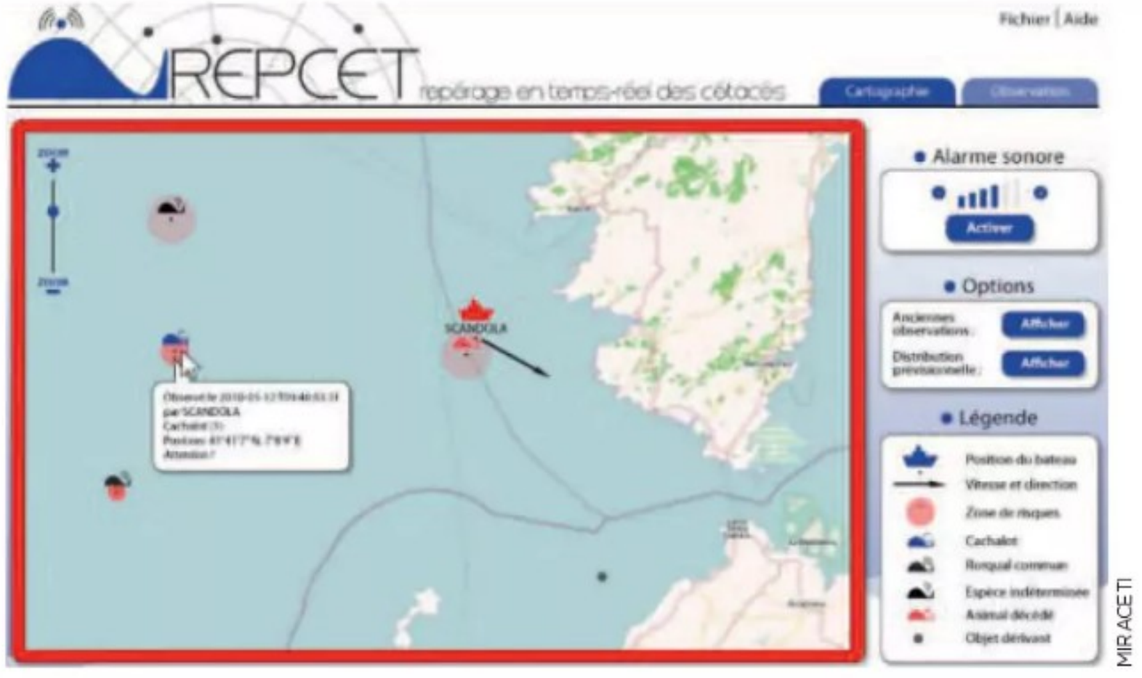
Dans certaines régions, le tourisme est devenu un fléau pour les mammifères marins, à l'instar de l'archipel des Canaries. Selon l'Institut national de la statistique d'Espagne, 14,6 millions de touristes ont rejoint ces îles de l'Atlantique en 2022, dont une large partie grâce à une flotte importante de ferrys rapides. La compagnie Fred Olsen dispose notamment d'un des plus grands trimarans à passagers au monde, le *Benchijigua Express,* capable d'atteindre une vitesse de plus de 40 nœuds (près de 75 km/h) en transportant environ 1300 passagers et 340 véhicules. Le catamaran rapide de nouvelle génération *Volcán de Tagoro*, de la compagnie Naviera Armas, emporte ses près de 1200 passagers et leurs véhicules à la vitesse de 36 nœuds. Or, on trouve dans ces mêmes eaux la plus grande population de globicéphales tropicaux (*Globicephala macrorhynchus*) au monde, notamment entre Tenerife et La Gomera. Cette population, qui compte plusieurs centaines d'individus, a un faible taux de reproduction annuel : les femelles n'atteignent la maturité sexuelle que vers l'âge de 8 à 12 ans et s'investissent pendant plusieurs années dans les soins parentaux envers leur progéniture. Si les collisions avec des ferrys engendrent plus de morts qu'il n'y a de naissances, la viabilité à long terme des globicéphales pourrait être menacée. Les armateurs se disent conscients du problème et équipent les bateaux de caméras à infrarouge pour détecter les baleines à distance. Mais l'efficacité du dispositif n'a pas encore été évaluée.

Les corridors de navigation qui pourraient être mis en place dans les prochains mois en Méditerranée nord-occidentale existent déjà dans d'autres régions du monde. Ces dispositifs de séparation du trafic (DST) dévient les routes maritimes en fonction des besoins des cétacés. C'est le cas notamment dans le golfe de Panamá, où plus de 14 000 navires empruntent chaque année le canal pour transiter entre l'Asie et la côte est américaine. Mais c'est aussi vers les eaux chaudes panaméennes que migrent chaque année deux populations de baleines à bosse qui parcourent des milliers de kilomètres depuis l'Antarctique et depuis l'Alaska pour se reproduire et donner naissance à leurs petits. Pour minimiser les contacts entre les animaux et la flotte marchande, il a été établi un passage obligatoire dans un corridor marin et, depuis 2013, une réduction de la vitesse à 10 nœuds (environ 18 km/h) du 1er août au 30 novembre de chaque année, dans les deux voies de circulation du dispositif.

Le plus gros DST au monde est établi au sud du Sri Lanka, une zone à fort trafic maritime. Ce couloir est l'une

BRIAN SKERRY / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

La baleine franche australe (« Eubalaena glacialis ») ne comptait plus en 2022 que 340 individus environ, dont 70 femelles reproductrices.



MIR ACETI

Le système de navigation Repcet permet de signaler l'observation de cétacés aux autres navires présents dans la zone afin qu'ils réduisent leur vitesse ou se déroutent.

des principales routes de navigation reliant l'Asie à l'Europe et voit transiter plus de 40 000 navires chaque année, selon l'OMI, en majorité des porte-conteneurs, des pétroliers, des méthaniers, des vraquiers et autres navires de transport de marchandises. Créé en 1980 pour gérer de manière sécurisée le volume important de trafic maritime, ce corridor s'est révélé chevaucher une importante zone de remontée d'eau (*upwelling*) sur le plateau méridional du Sri Lanka. *« Ces eaux spécifiques et la productivité biologique accrue associée à la remontée d'eau servent de zone d'alimentation majeure pour une grande variété d'espèces marines, y compris une proportion substantielle de la population du nord de l'océan Indien de baleines bleues menacées, connues pour être présentes dans ces eaux tout au long de l'année »*, soulignait en 2023 l'OMI dans un appel à établir un nouveau DST dans la région.

Éviter les zones d'habitat des cétacés

De fait, la présence des baleines bleues (*Balaenoptera musculus*) au large du Sri Lanka n'a été documentée qu'au début des années 1980 et cet habitat n'a donc pas été pris en compte lors de la mise en place du DST. Cette superposition malheureuse fait de cette route maritime l'une de celles où le risque de collision avec un cétacé est le plus élevé! Une étude dirigée par l'écologue sri-lankais Tharaka Priyadarshana en 2016 indiquait que le risque serait réduit de 95 % si la navigation se déportait de seulement 15 miles nautiques (environ 28 km) plus au sud. Pourtant, aucune modification du dispositif actuel n'a encore été approuvée par l'OMI. Ce qui a amené Armateurs de France, l'organisation professionnelle des entreprises françaises de transport et de services maritimes, à encourager *« ses membres à adopter des mesures volontaires de déroutement et/ou de réduction de la vitesse de leurs navires dans deux zones maritimes : la fosse hellénique en Méditerranée et le sud du Sri Lanka dans l'océan Indien, pour protéger les mammifères marins menacés dans ces régions. »*

La fosse hellénique, et plus spécialement les zones au sud-ouest du Péloponnèse et de la Crète, constitue l'un des cas les plus dramatiques au monde, puisque la population de cachalots y a été divisée par deux en dix ans et représente moins de 200 individus… Des armateurs comme Orange Marine ont donc suivi cette recommandation pour leurs navires en transit afin d'éviter de façon pérenne les zones d'habitat de cétacés. *« Les relativement faibles conséquences commerciales nous permettent d'adopter cette mesure d'évitement qui nous paraît pertinente d'un point de vue environnemental »*, a indiqué Didier Dillard, son président.

Une nouvelle initiative menée par le Benioff Ocean Science Laboratory de l'université de Californie à Santa Barbara (États-Unis) mise désormais sur l'intelligence artificielle (IA) pour surveiller l'activité des baleines le long de la côte californienne. Ce programme, appelé Whale Safe, combine plusieurs outils pour détecter la présence de baleines : des bouées équipées de capteurs acoustiques capables de détecter leurs vocalisations, des modèles prédictifs utilisant des données océanographiques et historiques sur leurs migrations, complétés par les observations faites sur le terrain par des scientifiques et autres navigants. Ces données sont analysées en temps réel et une carte interactive est mise à jour régulièrement pour indiquer aux navires les zones à risque de collision. Big data et IA seront peut-être demain le meilleur moyen de localiser les baleines dans l'océan, et donc de les protéger. ■

ACCIDENTS

Les courses à la voile n'y échappent pas

En novembre 2022, alors qu'il participait à la Route du rhum, célèbre course transatlantique en solitaire, le skipper français Fabrice Amedeo a violemment heurté un cétacé avec son voilier monocoque au large des Açores. Le choc a endommagé gravement la structure du bateau, l'obligeant à abandonner la course et, quelques jours plus tard, à déclarer son naufrage. Les fameux ofnis (objets flottants non identifiés), responsables de nombreuses collisions lors des grandes courses au large, regroupent des conteneurs tombés de bateaux et plus généralement des cétacés et autres mammifères marins. Les bateaux de course atteignent pour les plus rapides la vitesse de 30 à 40 nœuds (environ 55 à 75 km/h). À cette vitesse, une baleine endormie n'a aucune chance d'en réchapper. *« Les habitats des baleines sont souvent des endroits où le parcours de course nous emmène,* reconnaît la navigatrice Alexia Barrier. *Il y a encore aujourd'hui une* omerta *sur ce sujet, mais je m'attelle à sensibiliser les organisateurs de courses au large pour qu'ils modifient leur parcours en tenant compte de ces données. Il faut par ailleurs s'appuyer sur des logiciels de navigation pour signaler aux autres navigateurs une présence animale. »*

Le surtourisme pisté grâce au GPS des smartphones

En utilisant les données de géocalisation des téléphones portables, une start-up française a développé un outil qui inventorie les flux et la concentration des visiteurs dans un périmètre. De quoi mesurer l'impact humain sur des écosystèmes menacés par une surfréquentation.

Venise, Barcelone, l'île de Pâques, l'île de Porquerolles, le Mont-Blanc. Le point commun de ces lieux emblématiques ? Ils sont trop visités. L'afflux de touristes n'est plus supportable pour les populations locales et menace l'équilibre des milieux naturels, si bien que les autorités locales se voient obligées de prendre des mesures souvent impopulaires : instauration de quotas, paiement de péages, interdiction de zones à certaines heures ou saisons. Ainsi, le terme de « surtourisme » a-t-il émergé en 2017 pour devenir courant en 2022, avec la reprise post-covid.

Mais comment mesurer réellement le phénomène ? Lors d'une conférence organisée en 2023 par l'Institut de géographie et de durabilité de l'université de Lausanne (Suisse), les participants ont convenu qu'il fallait *« revenir aux grands principes de la sociologie historique de la quantification »*, c'est-à-dire mesurer l'ampleur du phénomène. Pas simple, car les outils actuels sont peu satisfaisants. Les données proviennent d'indices : fréquentations hôtelière et para-hôtelière, enquêtes auprès des populations locales, des acteurs du tourisme, des collectivités, sondages de satisfaction. Les espaces protégés utilisent par ailleurs des « éco-caméras » pour surveiller les flux de randonneurs aux abords des sites naturels les plus protégés. Ces outils sont imprécis et les méthodes utilisées ne sont pas harmonisées.

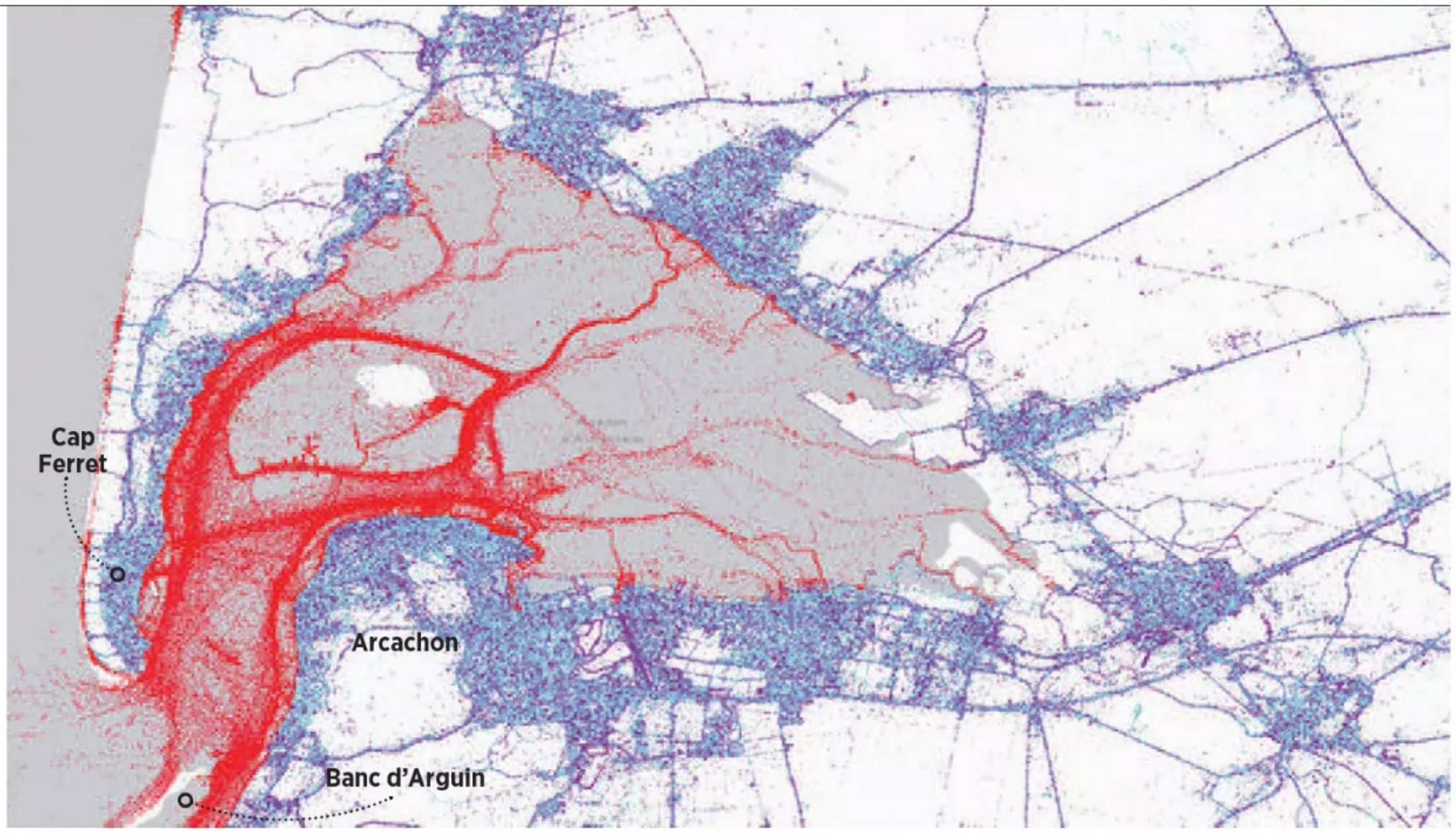
Voilà pourquoi la technique développée par la start-up française Citiprofile est en train de révolutionner le secteur. *« Grâce au GPS des smartphones, nous comptons des points en mouvement sur un territoire donné,* explique Arnaud Trousset, géographe, cofondateur de la société avec Olivier Thomine, ingénieur-chercheur en calcul haute performance. *Plus précisément, nous analysons de façon anonyme le nombre de personnes et de véhicules et leurs déplacements sur un territoire donné.* »

La méthode est simple mais demande une grande puissance de calcul. Citiprofile achète des lots de traçage de 5000 à 10 000 applications gratuites ou payantes présentes sur les smartphones qui indiquent la localisation de l'appareil, mais donnent aussi une idée de la nationalité et du lieu de résidence. *« Si un point se déplace sur un petit périmètre et revient tous les jours au même endroit pendant une durée de plusieurs mois, il est vraisemblable qu'il s'agit d'un habitant et non d'un touriste »*, explique Esprit Gibassier, data-journaliste dans cette entreprise créée en 2022. La vie privée des personnes n'est pas violée puisque les points sont anonymisés, et cette première étape est donc avalisée par le règlement général de protection des données (RGPD). ■ **Loïc Chauveau**

CITIPROFILE

« Nous analysons de façon anonyme le nombre de personnes et de véhicules et leurs déplacements sur un territoire donné »

Arnaud Trousset, géographe, cofondateur de la start-up toulonnaise Citiprofile

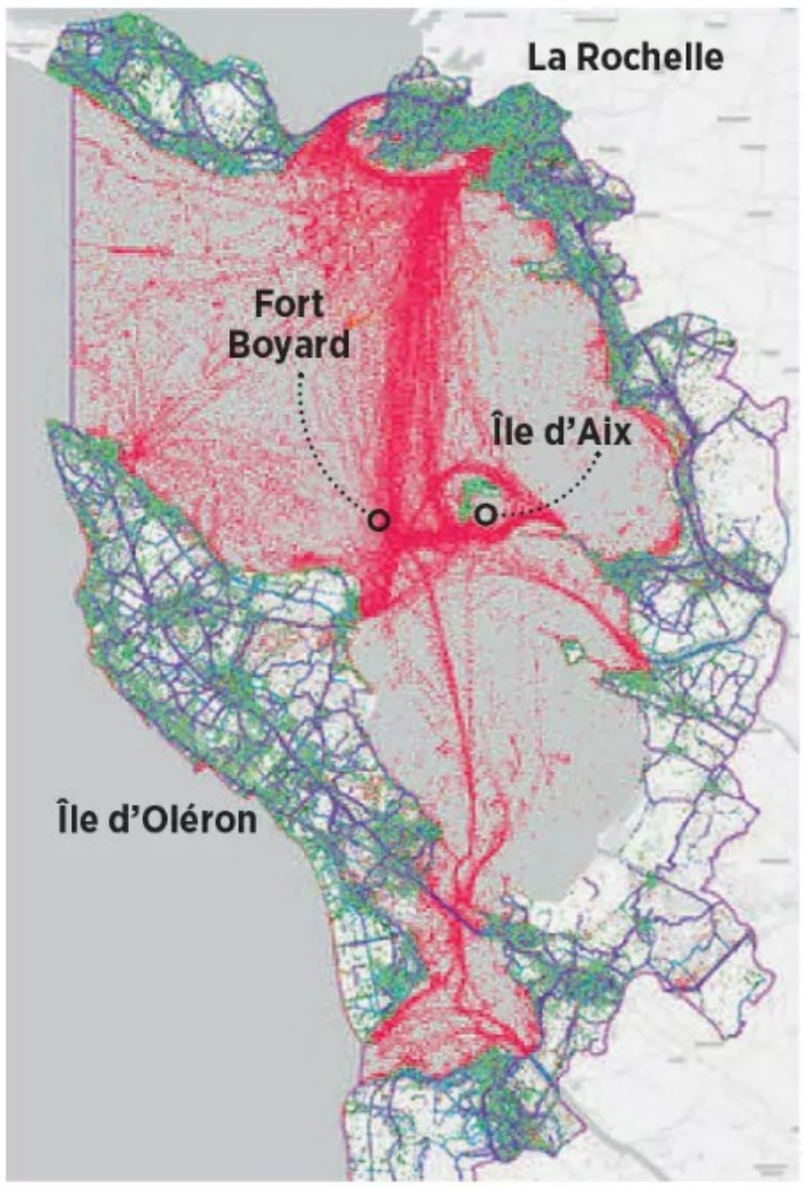


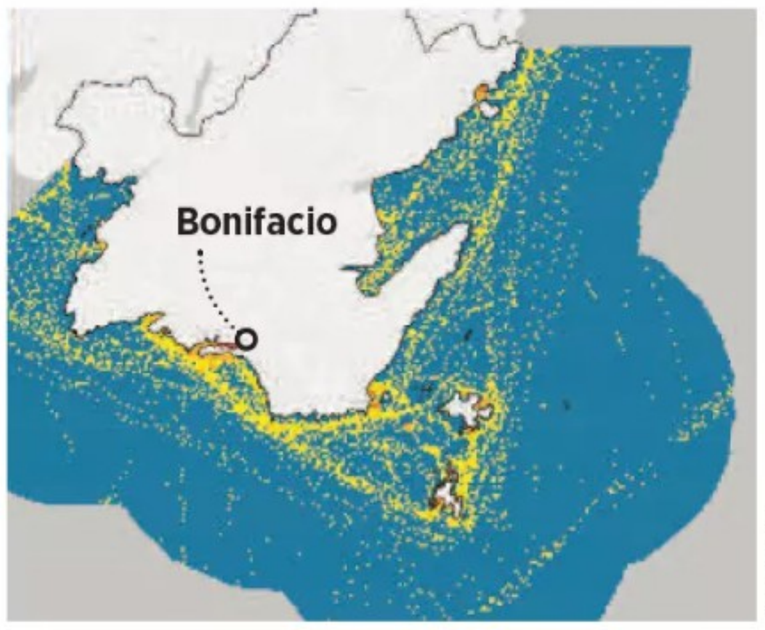
▲ Bassin d'Arcachon : affluence au banc d'Arguin

Le bassin d'Arcachon est l'un des sites qui connaissent le plus d'affluence l'été sur la côte aquitaine. Le suivi des GPS montre une forte fréquentation des plages et abords de la ville d'Arcachon et du cap Ferret et des visites importantes au banc d'Arguin, une vaste étendue de sable au pied de la dune du Pilat, qui est aussi un important site de reproduction d'oiseaux marins.

▶ Le fort Boyard pris d'assaut

Entre l'île de Ré et l'île d'Oléron avec en son centre l'île d'Aix, le perthuis d'Antioche connaît une forte fréquentation de plaisance l'été. Si les déplacements des navettes maritimes entre La Rochelle et les trois îles sont bien connus du fait de l'équipement des navires en système automatique d'identification, où vont les bateaux à moteur et à voile qui font moins de 12 mètres ? Le traçage par GPS permet de reconstituer les itinéraires choisis. Et de constater que le fort Boyard est la balade en mer la plus prisée. Sur terre, grâce à la vitesse du déplacement, la technique permet également d'affirmer si une personne est à pied ou utilise un vélo ou une voiture.





▲ Corse : les herbiers de posidonie surveillés

À la demande de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Citiprofile a utilisé les données GPS des propriétaires de bateaux pour caractériser les habitudes de déplacement ainsi que les mouillages en Corse, ici à la pointe de Bonifacio. Ces données ont été croisées avec la cartographie des herbiers de posidonie, une plante protégée de Méditerranée. Les gestionnaires peuvent ainsi intervenir dans les endroits où les habitudes de mouillage correspondent avec des herbiers, afin d'interdire ces endroits et obliger les plaisanciers à fréquenter des zones sableuses sans risque d'abîmer la plante.

Les tourbières, un rempart contre le carbone

Zones humides naturelles, les tourbières retiennent 30 % du carbone stocké dans les sols. Mais quand elles sont dégradées, elles deviennent émettrices de ce gaz à effet de serre. Dans le massif du Jura, un programme scientifique œuvre à la restauration de ces milieux fragiles.

Au bout de son bras, la pelleteuse jaune soulève un madrier, qu'elle place ensuite dans le sol. Les travaux de réhabilitation de la tourbière de Pré-Partot, à La Planée-Malpas (Doubs), ont débuté il y a quelques jours. Ils s'inscrivent dans un programme Life, cofinancé par l'Union européenne et coordonné par le conservatoire d'espaces naturels (CEN) de Franche-Comté, qui vise à restaurer 70 tourbières dans le massif du Jura. Beaucoup de ces zones humides sont en effet dégradées. Entre le XVIIIe et le XXe siècle, elles ont été exploitées pour leur tourbe : séchée, cette matière organique noire, semblable à de la terre, qui s'accumule au sein de ces milieux atypiques, servait de combustible. Dans d'autres pays, aujourd'hui encore, on l'extrait pour alimenter des terreaux.

Plusieurs drains avaient été creusés dans la tourbière des Meuniers, à Bois-d'Amont, afin de l'assécher puis l'exploiter.

La réhabilitation des tourbières implique des travaux d'ampleur, avec l'intervention de matériel spécifique.

De nombreuses tourbières ont aussi été drainées afin d'être asséchées, libérant ainsi des espaces de culture ou de pâturage. Mais dans ces zones, *« dès que le niveau d'eau baisse, la matière organique entre en contact avec l'oxygène, et elle est décomposée par les bactéries qui relarguent alors du carbone dans l'atmosphère »*, résume Aurélien Hagimont, chargé de mission à l'établissement public d'aménagement et de gestion de l'eau (Épage) Doubs-Dessoubre. Ce phénomène prend des proportions non négligeables dans la mesure où, si elles ne représentent que 3 % des terres émergées de la planète, les tourbières contiennent 30 % du carbone stocké dans les sols. *« Une tourbière dysfonctionnelle peut émettre jusqu'à 30 tonnes équivalent CO_2 par hectare et par an, ce qui correspond à un trajet en voiture d'environ quatre fois le tour de la Terre »*, avance le CEN. Ces milieux seraient ainsi responsables de près de 5 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine dans le monde. L'urgence est donc à la réhabilitation. *« Les tourbières ont été tellement dégradées qu'on ne peut pas les réparer,* prévient Aurélien Hagimont. *On peut juste leur redonner une bonne fonctionnalité. »* Autrement dit : éviter qu'elles ne deviennent des sources d'émission de carbone.

BRUNO BOURGEOIS

Entre 2014 et 2021, un premier programme Life, doté d'un budget de 8,5 millions d'euros, a déjà permis de réhabiliter 55 sites jurassiens sur 300 hectares — le massif compte plus de 500 sites, répartis entre la France et la Suisse. Pour cette deuxième phase, l'objectif principal des travaux reste le même : remettre en eau ces milieux. Coût total prévu : 12,5 millions d'euros. Mais avant tout chantier, une phase d'analyse s'impose. *« On doit déjà caractériser la tourbe, en effectuant des carottages »*, explique Geneviève Magnon, chargée de mission Life à l'Épage. En guise de démonstration, elle plonge un tuyau métallique dans le sol pour en retirer un échantillon de tourbe : *« Il faut déterminer à quelle profondeur elle se trouve, si elle est minéralisée ou non… Nous identifions également les points de drainage, ainsi que les sources d'alimentation en eau de la tourbière, grâce aux cartes Lidar* [la technologie laser utilisée pour établir des cartographies]. *Ce sont deux ans de préparation, pour trois semaines de chantier. »*

REPÈRES

Qu'est-ce qu'une tourbière ?

Selon le Pôle relais tourbières, une tourbière est *« un milieu caractérisé par la présence, ou la formation, d'un sol composé de tourbe, soit de la matière organique très peu décomposée. »* On la trouve dans des zones saturées en eau : en l'absence d'oxygène, la végétation ne se dégrade que très lentement et partiellement, s'accumulant pour former la tourbe. C'est la présence de cette matière qui différencie les tourbières des divers marais. Un recensement des tourbières françaises est en cours. Elles se situent principalement en montagne et sur la côte occidentale, mais se développent aussi dans d'autres zones.

La tourbe, matière organique noire, s'accumule dans le sol, si celui-ci reste suffisamment humide.

À la Planée-Malpas, un barrage en bois est construit afin de retenir l'eau, condition indispensable à la bonne santé de la tourbière.

Les quantités de dioxyde de carbone et de méthane présents dans le sol sont relevées par l'entreprise CarboFlux grâce à une chambre d'accumulation et un analyseur (à gauche) qui affiche en direct sur une tablette les taux de CO_2 et de CH_4 détectés (à droite).

À Pré-Partot, la pelleteuse est en train d'édifier une première palissade de 35 mètres de long, en enfilant des madriers côte à côte dans le sol, dans l'exutoire d'une ancienne fosse de drainage d'extraction de la tourbe. « *Cette armature permettra de ralentir le flux de l'eau* », décrit Geneviève Magnon. Derrière ce barrage, l'eau pourra même s'accumuler. L'opération est délicate : l'engin, à très faible portance, avance sur des plateaux de bois afin de ne pas détériorer le sol. « *Chaque morceau de bois est enfoncé à une profondeur précise* », ajoute Geneviève Magnon.

Le tracé de certains cours d'eau réaménagé

Par-dessus les madriers sera apposé un géotextile. Les anciens drains peuvent également être rebouchés avec de la tourbe prélevée sur place ou avec de la sciure. Sur certains sites, le réaménagement du tracé des cours d'eau — « reméandrement » — est nécessaire pour rendre à l'écosystème un fonctionnement plus naturel et un niveau de nappe plus élevé.

Pour évaluer l'efficacité de ces travaux, différentes mesures sont réalisées sur les sites. L'évolution des niveaux d'eau avant et après les interventions est particulièrement suivie, grâce à l'installation de piézomètres, enfouis dans le sol. « *Des relevés sont effectués toutes les heures grâce à des systèmes électroniques* », relate Geneviève Magnon, en retirant la sonde de son emplacement. Les émissions de gaz font également partie des données observées de près. Sur sept sites, une entreprise a été missionnée pour mesurer les échanges de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4). Adrien Jacotot et Inès Gayral, fondateurs de CarboFlux, se déplacent une fois par mois dans le Jura. En cet après-midi d'août, ils ont sorti leur matériel à Bois-d'Amont (Jura), à une cinquantaine de kilomètres de Pré-Partot. Le sol de cette tourbière des Meuniers, « *très dégradée* », est à peine mouillé. « *Sur d'autres sites, on a parfois de l'eau au-dessus des genoux* », rapporte Adrien Jacotot. Pour effectuer leurs mesures, le docteur en géochimie environnemental et sa collègue écologue utilisent la méthode des « chambres d'accumulation ». Inès Gayral place un cylindre en plexiglas au-dessus d'un socle posé au sol. « *Si le sol émet du gaz, il s'accumule sous cette cloche* », décrit Adrien Jacotot. La chambre est branchée à un analyseur, relié lui-même à une tablette, sur laquelle s'affichent en direct les quantités de CO_2 et de CH_4 détectées. Les deux scientifiques apposent ainsi leur cylindre durant une minute et demie à trois minutes, sur chacun des huit points éparpillés sur le site. « *Nous faisons une mesure en pleine lumière, et une dans l'obscurité totale pour simuler les conditions de nuit* », précise Adrien Jacotot, en montrant une chambre opaque.

100 000
hectares
La superficie totale estimée des tourbières en France.

Les valeurs obtenues sont croisées avec les niveaux d'eau et de luminosité, et avec la température de l'air. « *Mais ce sont des mesures instantanées, et même si elles sont fiables, elles ne représentent que l'instant de la mesure* », prévient le chercheur. Des modélisations sont donc nécessaires afin d'évaluer si l'écosystème tend à émettre ou à puiser du carbone sur une période donnée. « *Au début de leur remise en eau, les tour-*

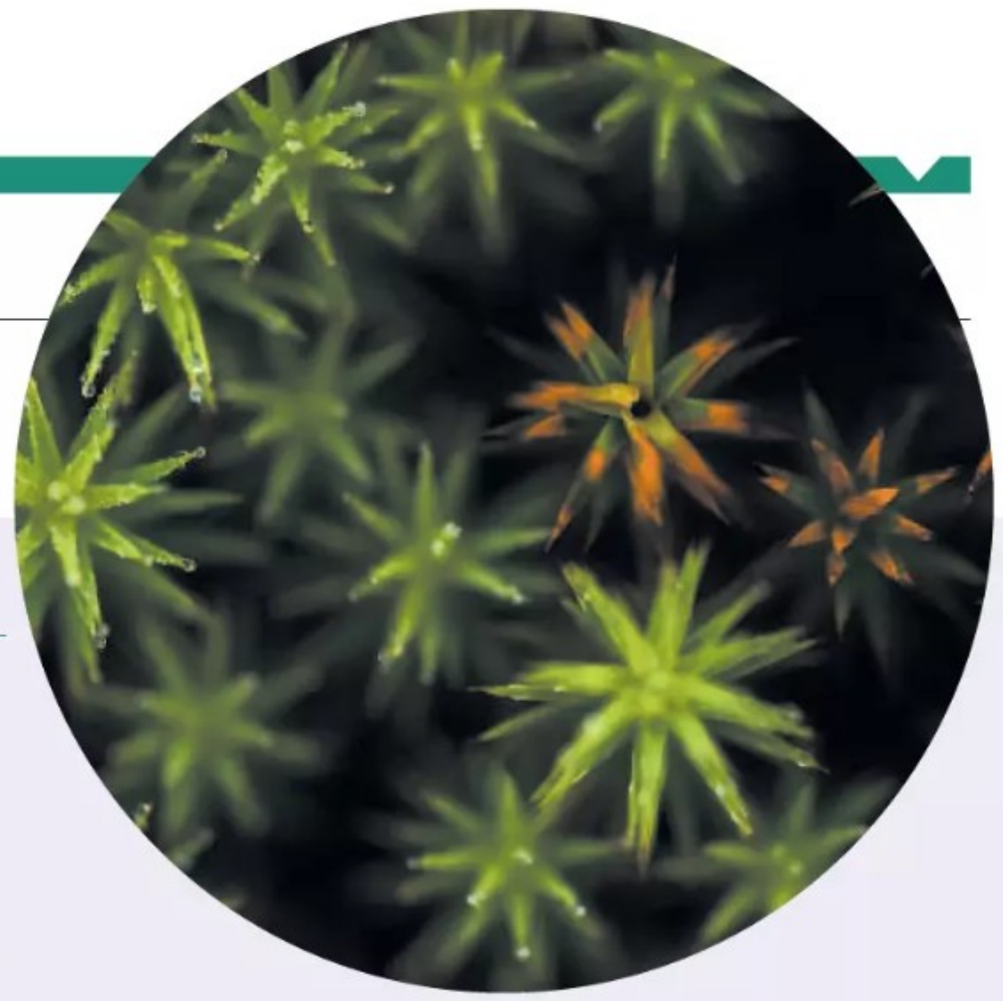
bières rejettent un peu de méthane, mais la durée de vie de ce gaz est moins longue que celle du CO_2, donc la réhabilitation reste préférable », détaille-t-il. Ces mesures de carbone n'ont pas pu être réalisées dans le cadre du premier programme Life, et les impacts des travaux sur les émissions de gaz des tourbières réhabilitées risquent de tarder à se faire sentir, tant l'accumulation de la tourbe est un processus lent.

Restaurer 50 % des tourbières d'ici à 2050 en Europe

Mais déjà, sur les sites du premier programme, *« les niveaux d'eau sont remontés »*, observe Geneviève Magnon, qui nuance toutefois : *« Lors des fortes sécheresses que nous avons subies ces dernières années, ils sont descendus moins bas qu'avant, mais ils ont quand même fortement diminué, plus qu'on ne l'aurait pensé. » « Nous ne sommes pas du tout certains que notre capacité à remettre en eau ces sites permettra d'aller plus vite que le réchauffement climatique »*, confirme Daniel Gilbert, professeur à l'université de Franche-Comté et spécialiste de ces milieux. Car les tourbières sont essentiellement alimentées en eau par les pluies ; à l'inverse, les sécheresses et les fortes chaleurs, de plus en plus fréquentes même dans le Jura, accélèrent la dégradation de ces milieux. *« En réhabilitant, au mieux on freine le processus, et on évite des émissions de carbone ; au pire, on perd du carbone, mais dans des quantités moindres,* synthétise Daniel Gilbert. *Si on ne fait rien, tous ces systèmes basculeront en sources très fortes de carbone. »*

La loi européenne sur la restauration de la nature, adoptée en juin dernier, fixe aux États membres l'objectif de restaurer 30 % des tourbières d'ici à 2030, et 50 % d'ici à 2050. Mais la définition même de tourbière et de zone humide n'est pas toujours claire. Toutefois, à l'image de ce qui est mené dans le massif jurassien, différents programmes consacrés à la réhabilitation de ces zones sont déployés ailleurs en France, mais aussi en Estonie, en Allemagne ou encore en Suède. La mise en œuvre de tels travaux n'est pas toujours simple, puisqu'il faut allier expertises scientifiques et techniques, tout en réglant la problématique du foncier, sur des terrains, en France, parfois divisés entre plusieurs propriétaires qui les exploitent. Les coûts de restauration, eux, varient selon la configuration des lieux. Résultat, selon Daniel Gilbert : *« La restauration se fait principalement sur des tourbières qui vont plutôt bien, alors que si on veut s'attaquer à la problématique du carbone en étant "rentables", il faudrait viser les plus détériorées. »* Mais le professeur est formel : *« De toute façon, il faut restaurer, rapidement. »* ■ **Camille Jourdan**

Photos : Mathieu Cugnot pour Sciences et Avenir



NATURAGENCY

VÉGÉTATION

Les sphaignes, stars des tourbières

Appartenant à la famille des mousses, les sphaignes *(photo)* sont typiques des tourbières du Jura. Elles sont même indispensables à la bonne santé de celles-ci, dans la mesure où c'est en se décomposant que ces petites plantes, qui oscillent du jaune au rouge en passant par le vert, forment la tourbe. Espèces protégées, elles se développent dans des milieux inondés en permanence. En conséquence, les autres végétaux peinent à pousser près d'elles, d'autant plus qu'elles captent des éléments minéraux essentiels à la survie de leurs voisins… Certains y parviennent toutefois, à l'image du droséra, une plante carnivore. L'orchidée liparis de Leosel et les fleurs jaunes de la saxifrage œil-de-bouc — qui a fait l'objet d'une campagne de réintroduction — sont également réapparues sur certains sites jurassiens après les travaux du premier programme Life. En revanche, les épicéas, les bouleaux, ou encore la molinie, une graminée « croqueuse de tourbe », sont souvent les indicateurs d'une tourbière en mauvaise santé, puisqu'ils témoignent d'un sol plus suffisamment imprégné d'eau.

DANIEL GILBERT

« Si on veut s'attaquer à la problématique du carbone, il faudrait viser les tourbières les plus détériorées »

Daniel Gilbert, professeur à l'université de Franche-Comté et spécialiste des tourbières

Stress, sommeil, sport...

Les super-pouvoirs de la respiration

Maîtriser son souffle permet de soulager nombre de maux, comme le stress, la douleur ou l'anxiété. En plus du yoga, de nouvelles techniques respiratoires sont proposées pour apaiser le corps et l'esprit. De fait, la recherche a beaucoup progressé dans le décryptage des mécanismes cérébraux qui commandent les poumons.

Dossier réalisé par
Cécile Coumau
et Guillaume Jacquemont

TECHNIQUES
Le souffle, maître des émotions cérébrales p. 56

BIEN-ÊTRE
Le chant ralentit le rythme respiratoire p. 58

STRESS
Respirer des odeurs agréables p. 61

ENTRETIEN
Maladies respiratoires : de nouveaux facteurs de risque p. 64

RECHERCHE
À la découverte du microbiote pulmonaire p. 67

SHUTTERSTOCK

Le souffle, maître des émotions cérébrales

Le va-et-vient d'air que nous faisons circuler dans nos poumons agit directement sur le cerveau. De nombreuses techniques respiratoires apportent un bénéfice physique et mental. Des études scientifiques attestent des effets anti-stress d'un souffle maîtrisé.

« *L'arrêt des tourbillons de l'esprit* » : c'est ainsi que l'érudit indien Patanjali définissait le yoga vers le IIe siècle avant notre ère. L'intérêt est majeur, tant notre esprit a tendance à « tourbillonner » en de multiples circonstances : quand nous ruminons le passé, quand nous imaginons le pire pour une réunion ou un examen à venir, quand toutes sortes de pensées nous empêchent de fermer l'œil la nuit… Ce qui n'a rien de bénéfique pour l'humeur et la santé mentale. Pour apaiser l'esprit, le yoga s'appuie en grande partie sur le travail du souffle — le *pranayama*, littéralement « contrôle de la force vitale ». L'impact de la respiration sur notre psychisme est donc connu depuis des millénaires, mais ce n'est qu'à la fin du XIXe siècle que le yoga est introduit en Occident, et encore beaucoup plus récemment que la science s'y est intéressée. D'abord, pour confirmer le pouvoir apaisant du souffle et mieux cerner les techniques qui fonctionnent. Ensuite, pour examiner comment ce va-et-vient d'air que nous faisons circuler dans les poumons agit sur le cerveau. Et enfin, pour déterminer dans quelles circonstances les techniques respiratoires sont bénéfiques.

GETTY IMAGES

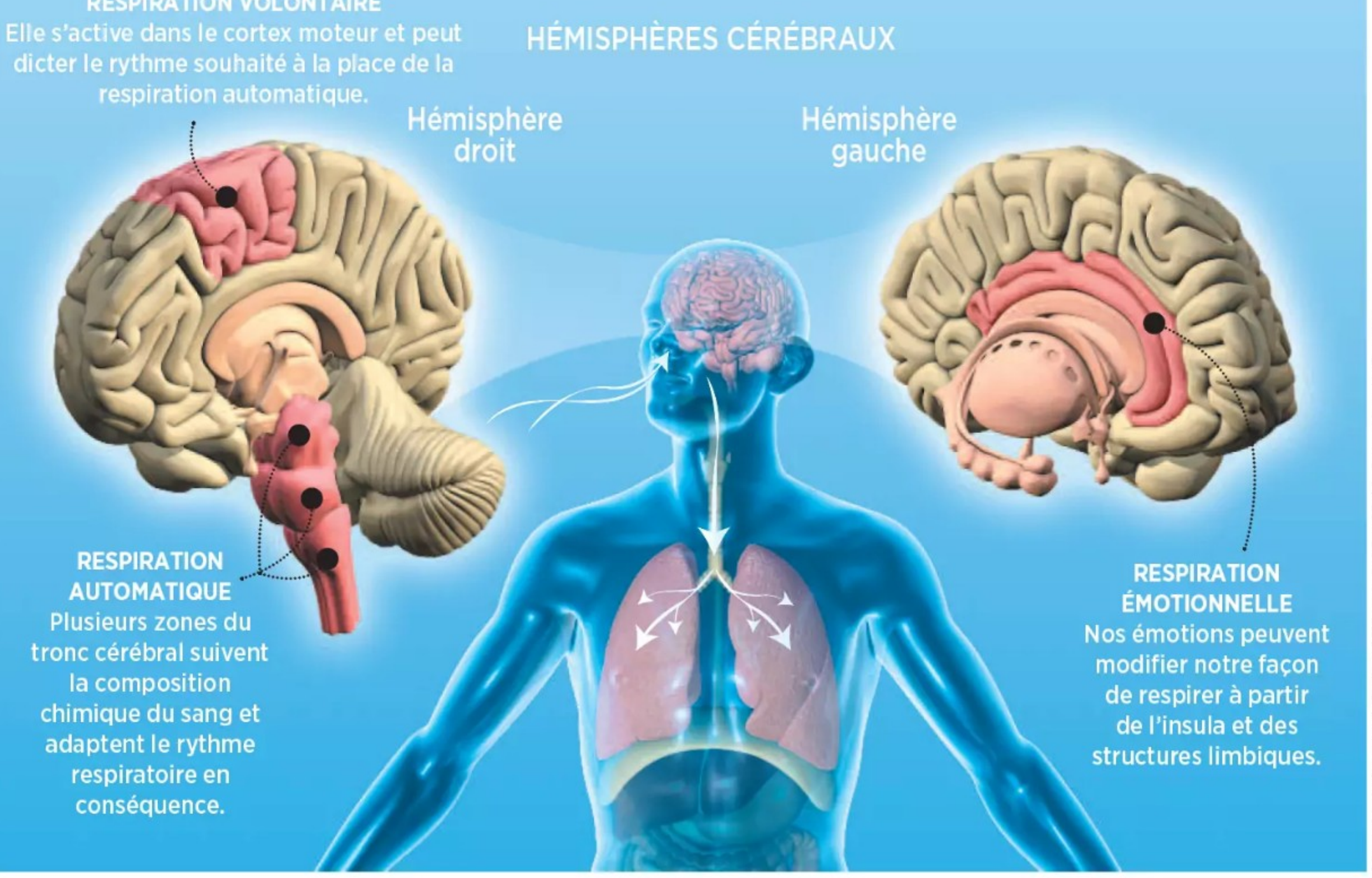
Les techniques respiratoires du yoga intéressent la science qui a montré leur action sur les troubles de l'anxiété.

L'arsenal proposé par le yoga et d'autres méthodes traditionnelles ou modernes est aussi pléthorique qu'imagé : respiration carrée, alternée, rafraîchissante, du feu, du soufflet, de l'océan… « *Toutes les techniques existantes n'ont pas été analysées scientifiquement, mais les recherches modernes ont largement confirmé le pouvoir apaisant d'une partie de ce savoir-faire respiratoire* », explique Thomas Similowski, pneumologue et directeur d'une unité de recherche en neurophysiologie respiratoire (Inserm-Sorbonne Université).

La seule fonction vitale contrôlable par la volonté

Premier exercice, le plus simple : se focaliser sur son souffle. Il s'agit juste de prendre conscience de sa respiration, sans chercher à la modifier : sentez par exemple votre poitrine et votre ventre qui se gonflent et se dégonflent ; remarquez l'air qui atteint et traverse votre nez ; notez comme il est frais à l'entrée, puis réchauffé par sa circulation dans votre organisme à la sortie… Et poursuivez quelques minutes. Si cette technique est possible, c'est parce que le cerveau suit en permanence tout ce qui se passe dans l'appareil respiratoire. En temps normal, il filtre ces informations, ce qui évite à l'esprit d'être envahi par le bruit de fond qui remonte du corps — un phénomène poétiquement qualifié de « silence des organes ». Mais

Les trois systèmes de commande de la respiration



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : LES SUPERPOUVOIRS DE LA RESPIRATION, ALBIN MICHEL, 2024.

il suffit de se concentrer dessus pour en prendre conscience. Le pouvoir antistress de cette technique est notamment attesté par les travaux publiés en 2022 par la chercheuse indonésienne Maria Komariah et ses collègues, qui l'ont proposée à une soixantaine d'étudiants au cours d'un essai. De fait, la focalisation sur le souffle détourne l'attention des ruminations négatives qui assombrissent l'humeur. « *C'est un peu comme si vous vous concentriez sur une partie de mikado ou le coloriage d'un mandala : vous oublierez un temps votre découvert bancaire ou votre mal de dos* », explique Thomas Similowski.

Au niveau cérébral, cela se traduirait par une désactivation du réseau dit du mode par défaut, responsable du vagabondage mental, qui s'allume dès que l'on n'est pas concentré sur une tâche particulière. Les résultats obtenus en 2016 par Anselm Doll et ses collègues de l'université technique de Munich (Allemagne) suggèrent également que l'exercice de focalisation sur le souffle active le cortex préfrontal, impliqué dans le contrôle de l'attention, qui se met à brider l'amygdale, un centre cérébral de l'anxiété. Cet exercice pourrait également augmenter la libération de sérotonine, une molécule clé de l'humeur dont la production est influencée par le cortex préfrontal.

La respiration est la seule fonction vitale qui soit contrôlable par la volonté. Ainsi, s'il est possible de bloquer sa respiration pour une apnée ou d'accélérer son souffle pour hyperventiler, il n'est pas possible de faire de ▸

FLORENCE BROCHOIRE

« Les recherches modernes ont largement confirmé le pouvoir apaisant du yoga et d'autres méthodes traditionnelles »

Thomas Similowski, pneumologue et directeur d'unité de recherche en neurophysiologie respiratoire (Inserm-Sorbonne Université)

même avec les battements du cœur. L'explication se trouve là aussi dans le cerveau, où il existe plusieurs systèmes de commande de la respiration. Le premier est purement automatique : plusieurs régions du tronc cérébral suivent en permanence la composition du sang et accélèrent la respiration de façon réflexe s'il est trop riche en dioxyde de carbone ou trop pauvre en dioxygène. Mais il existe un autre système, situé dans le cortex (à la surface du cerveau), qui peut temporairement outrepasser la respiration automatique et dicter le rythme souhaité. Un troisième système, composé de régions émotionnelles, influence également le souffle, qui devient un reflet fidèle de nos ressentis intimes *(voir l'infographie p. 57)*.

La respiration lente active le système parasympathique

La capacité de moduler le rythme à volonté est ce qui rend possible les techniques respiratoires. La mieux validée scientifiquement est probablement celle de la respiration lente, qui consiste à faire descendre le rythme respiratoire à moins de dix cycles par minute (soit six secondes par cycle), contre 12 à 15 en temps normal. L'exercice pousse automatiquement à amplifier chaque cycle afin de continuer à assurer les besoins physiologiques (la quantité d'air inspirée par minute doit rester constante). Cette technique active puissamment le système parasympathique — la branche « ralentisseuse » du système nerveux, qui diminue notamment la fréquence cardiaque et la libération de cortisol, une hormone du stress. Et ce, par deux moyens.

Tout d'abord, en déclenchant le réflexe dit de Hering-Breuer. Il s'agit d'une décharge parasympathique qui stoppe le gonflement des poumons quand il devient excessif, afin d'éviter qu'ils ne s'abîment. Ce réflexe protecteur a pour bénéfice collatéral de nous apaiser, grâce aux connexions du système parasympathique avec les centres émotionnels du cerveau. « *N'hésitez pas à l'éprouver par vous-même,* conseille Thomas Similowski. *Gonflez vos poumons en vous forçant à inspirer le maximum d'air possible, puis relâchez et expirez. En mesurant votre pouls, vous observerez une légère décélération de votre cœur. Et vous sentirez que, psychologiquement, "ça va mieux".* » Le second mécanisme réside dans une augmentation des oscillations du système parasympathique, qui accroît son activité moyenne. De manière générale, le cerveau déclenche deux ondes parasympathiques en lien avec la respiration. La première conduit à laisser cycliquement les poumons se gonfler. La seconde stabilise la pression artérielle et le débit cardiaque, car le gonflement et le dégonflement de la poitrine entraînent des cascades de variations

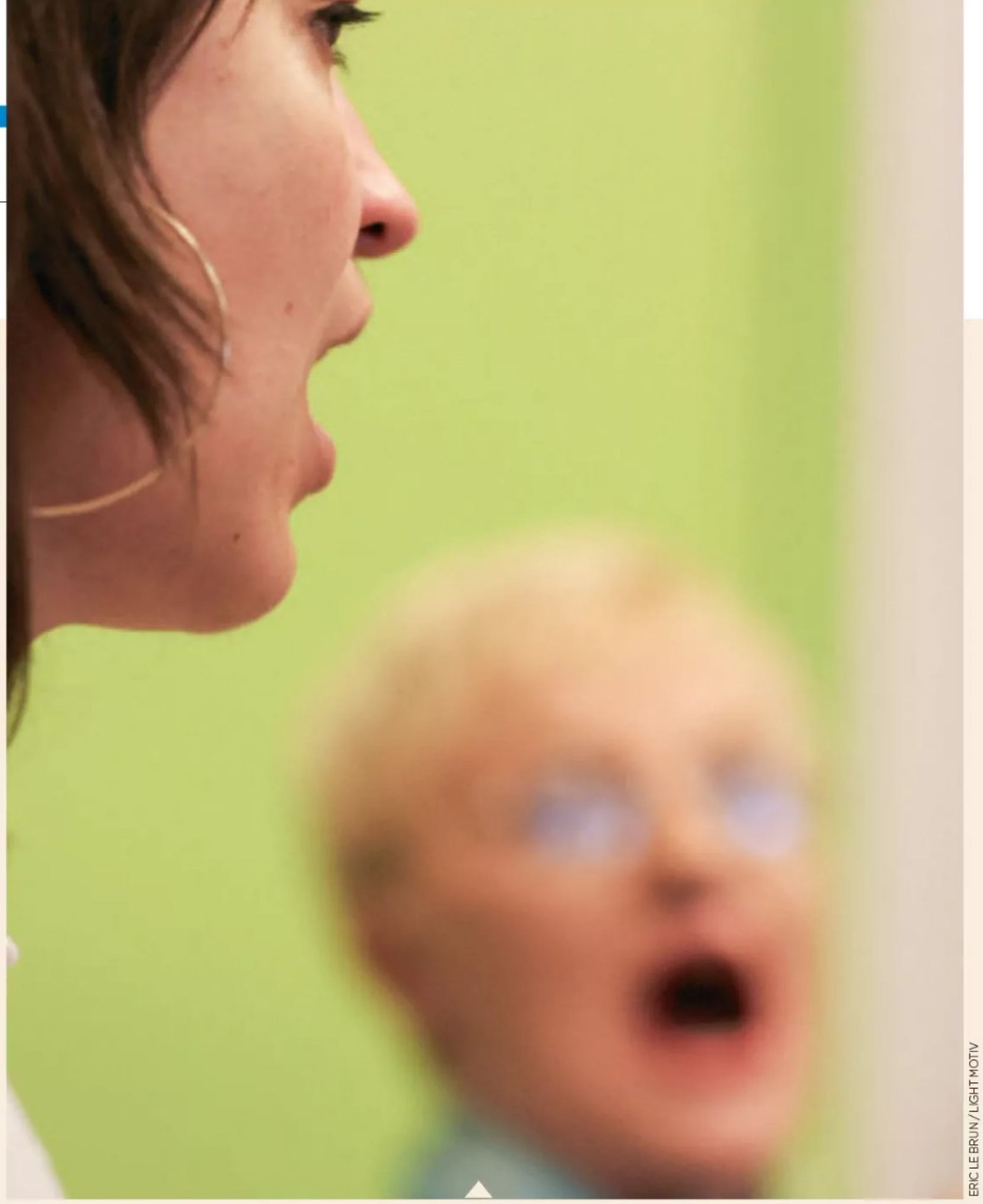
L'influence de la respiration sur le cerveau est maximale quand elle passe par le nez, dont le fond est tapissé de multiples terminaisons nerveuses

NEUROCHIMIE

Le chant ralentit le rythme respiratoire

Les techniques respiratoires ne sont pas le seul moyen de jouer avec son souffle : cela se fait naturellement en parlant ou en chantant. La voix s'allume en effet lorsque le souffle d'air qui remonte des poumons fait vibrer les cordes vocales. Nous parlons donc toujours sur l'expiration. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer de prononcer quelques paroles en inspirant. Parler ou chanter, c'est adopter un rythme respiratoire particulier. Or, ce rythme a le pouvoir de nous apaiser, comme l'a montré le chercheur et professeur de yoga Nicolò Bernardi. En 2017, ce scientifique s'est penché avec des collègues sur le chant, dont les bienfaits sont attestés par de nombreux travaux. Ces bienfaits passent par diverses voies neurochimiques — chanter dans une chorale entraîne par exemple la libération de molécules atténuant le stress et favorisant le bien-être, comme l'ocytocine ou les endorphines, dans le cerveau des chanteurs — mais pas seulement. Les travaux de Nicolò Bernardi ont ainsi montré que chanter (sur un *tempo* pas trop rapide) conduit à ralentir le rythme respiratoire, et ainsi à activer le système apaisant de l'organisme — le système parasympathique. L'effet était même supérieur avec le « *vocal toning* », pratique consistant à fredonner des voyelles sur un air improvisé :

le rythme respiratoire descendait alors particulièrement bas, atteignant celui de la cohérence cardiaque (six respirations par minute). Un rythme également retrouvé dans une autre étude étonnante de ce chercheur, où les participants devaient cette fois réciter… des prières ! Ils répétaient en boucle un mantra de yoga ou un *Ave Maria* en latin. Le pouvoir apaisant des prières viendrait donc en partie de la respiration : *« Différentes traditions corps-esprit à travers l'histoire pourraient avoir convergé vers des pratiques exploitant le mécanisme de base de la respiration profonde »*, explique Nicolò Bernardi.



ERIC LE BRUN / LIGHT MOTIV

La pratique de la chorale libère des neuropeptides comme l'ocytocine, qui renforce le bien-être.

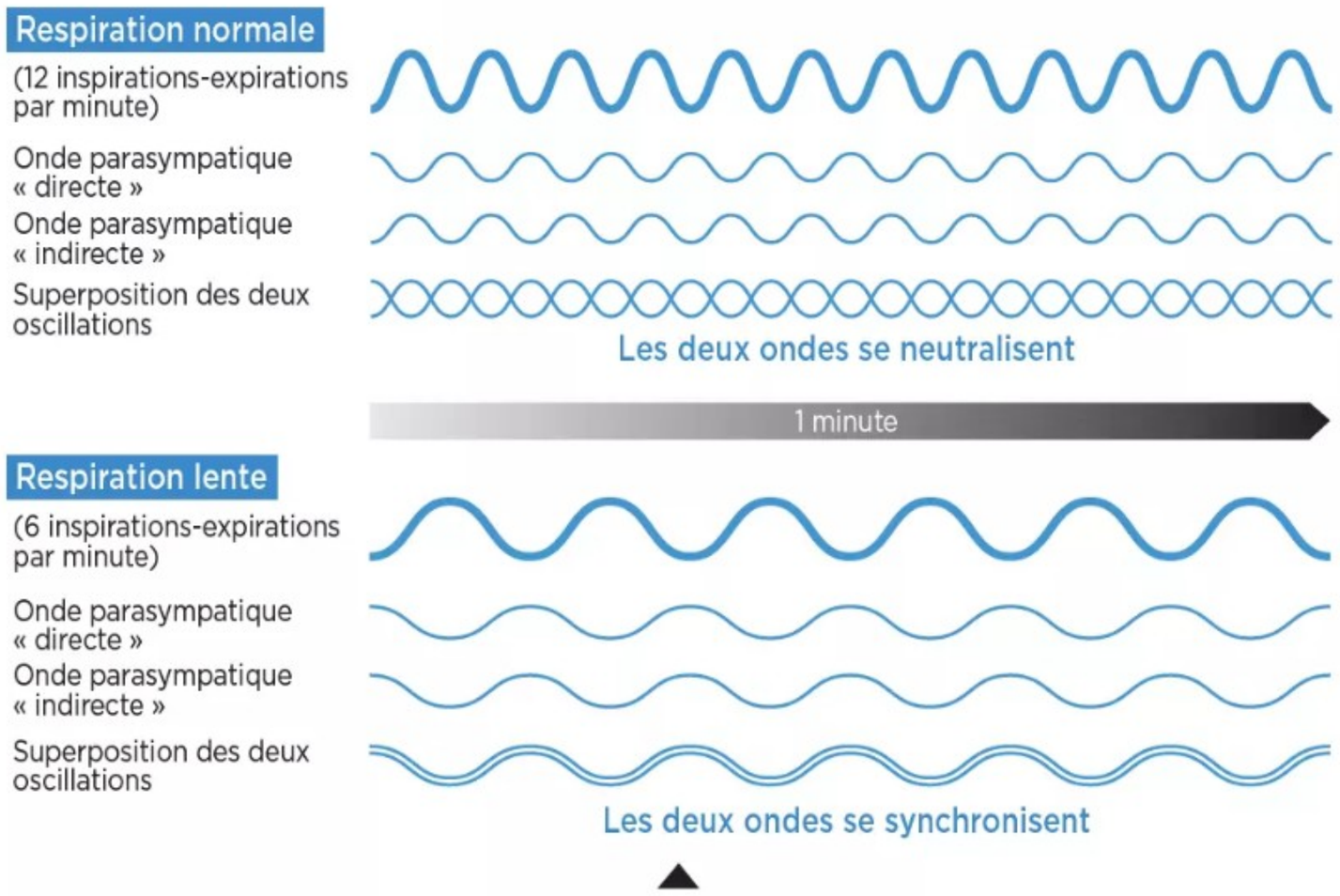
de pression qui affolent un peu le cœur. Or, les recherches montrent que ces deux ondes se synchronisent quand la respiration ralentit. À la fréquence d'environ six respirations par minute (un cycle toutes les dix secondes), la synchronisation est parfaite : il se produit une résonance, c'est-à-dire que les pics et les creux des deux ondes parasympathiques se superposent, produisant des oscillations maximales, et donc un fort effet apaisant. C'est la fréquence préconisée par la technique dite de la cohérence cardiaque *(voir les courbes p. 60)*. Pour la pratiquer, on conseille souvent de compter cinq secondes à chaque inspiration et autant à chaque expiration. Une autre forme de respiration lente intéressante est la technique du double soupir, qui consiste à inspirer une première fois lentement jusqu'à avoir l'impression que les poumons sont remplis, puis à reprendre une seconde inspiration. En 2024, l'équipe d'Andrew Huberman, à l'université Stanford (États-Unis), a montré que pratiquer cinq minutes par jour ces doubles soupirs, suivis d'une longue expiration, entraîne une baisse de l'anxiété et une augmentation des émotions positives — cette augmentation étant même plus marquée qu'avec des exercices de méditation de pleine conscience.

Autre préconisation fréquente : respirer par le nez. En 2018, Andrea Zaccaro et ses collègues de l'université de Pise (Italie) ont passé en revue les recherches sur le sujet et conclu que respirer lentement par le nez entraînait une intensification des ondes dites alpha (associées à un état de relaxation légère), ainsi que d'autres modifications de l'activité cérébrale dans des régions régulant le bien-être. De fait, nombre de travaux montrent que l'influence de la respiration sur le cerveau est maximale quand elle passe par le nez, dont le fond est tapissé de multiples terminaisons nerveuses et séparé de l'encéphale par une simple lame osseuse criblée de trous.

POUR EN SAVOIR PLUS

- *Les Superpouvoirs de la respiration*, Thomas Similowski et Guillaume Jacquemont, Albin Michel, 2024.

Comment parvenir à la cohérence cardiaque



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : LES SUPERPOUVOIRS DE LA RESPIRATION, ALBIN MICHEL, 2024.

Quand la respiration ralentit, les pics et les creux des deux ondes parasympathiques se superposent, produisant un fort effet apaisant.

▶ *Quid* de la respiration « par le ventre », souvent préconisée dans les cours de yoga ? Elle consiste à contracter le diaphragme, ce muscle qui étire les poumons vers le bas — et non à envoyer de l'air dans l'estomac, ce que l'on serait bien en peine de faire ! Le nom de la technique vient de ce que le diaphragme appuie sur l'abdomen et fait ressortir le ventre, un peu comme si l'on appuyait sur un ballon. « *Si aucune étude ne l'a montré de façon rigoureuse, on peut en effet penser que la respiration par le ventre produit un effet apaisant,* estime Thomas Similowski. *En effet, elle accroît le gonflement des poumons — ce qui intensifie probablement le réflexe de Hering-Breuer —, et comprime le système digestif, abondamment innervé par le système parasympathique, qui s'active alors sans doute davantage.* »

Grâce à leur pouvoir apaisant, les techniques respiratoires seraient d'une grande aide dans de multiples situations du quotidien. Tout d'abord, en cas de crise de panique. Ces crises entraînent une hyperventilation qui évacue en accéléré le dioxyde de carbone sanguin, d'où une cascade de réactions chimiques susceptibles de perturber l'activité nerveuse et de déclencher un cortège de symptômes : vertiges, picotements, crampes… Appliquer une technique qui ralentit la respiration permet alors de contrer ce phénomène. « *Lors des attaques de panique, je propose aux patients la respiration "au carré", qui comprend quatre phases de durée égale (inspiration, pause, expiration, pause),* explique Sophie Lavault, psychothérapeute et docteure en neurosciences. *L'objectif est de lutter contre l'hyperventilation et le sentiment de perte de contrôle sur son corps, en se concentrant sur quelque chose de physiologique que l'on arrive "enfin" à maîtriser.* » Sachant que la durée de chaque phase peut varier de deux à quatre secondes, selon les capacités de chacun : « *Cela doit rester faisable et pas trop inconfortable,* poursuit la psychothérapeute. *Lorsqu'on fait une attaque de panique et qu'on hyperventile, tenir deux secondes sur chaque phase est déjà très bien !* »

Une réduction du stress et des pathologies qui y sont associées

Cette capacité à brider la peur explique l'efficacité des techniques respiratoires contre les phobies et autres angoisses irraisonnées. Dans une étude publiée en 2017 par le chercheur allemand Youssef Shiban et ses collègues, des patients terrorisés par l'avion étaient immergés en réalité virtuelle dans une cabine de Boeing 737, tout en respirant lentement par le ventre. Résultat : ils ont davantage maîtrisé leur peur que les membres du groupe témoin qui ne pratiquaient pas de technique respiratoire pendant cette immersion.

Autre exemple : la technique qui consiste à inspirer lentement par une narine et à expirer par l'autre (tout en bouchant alternativement avec le doigt la narine qui ne sert pas), s'est révélée apaisante dans une étude indienne à petite échelle, où les participants devaient prononcer un discours en s'imaginant que le Premier ministre les écoutait. D'autres études ont même permis d'obtenir une réduction des symptômes de stress post-traumatique chez des populations confrontées à diverses épreuves extrêmes : le ▶

DÉBORAH FARNAULT

« Des effets durables sur le bien-être physique et mental sont démontrés à partir de 10 à 15 minutes de cohérence cardiaque par jour »

Sophie Lavault, psychothérapeute et docteure en neurosciences

CRISTINA PEDRAZZINI/SPL/SUCRÉ SALÉ

Inhaler des fragrances pousse de manière inconsciente à ralentir et amplifier sa respiration, favorisant la relaxation.

NEUROPHYSIOLOGIE

Respirer des odeurs agréables

Les odeurs du monde sont apportées par le flux d'air qui vient chatouiller les narines. Mais le lien entre odeurs et respiration va plus loin, comme l'a montré une expérience italienne où les chercheurs ont injecté des essences de menthe ou de citron dans le sang de volontaires. Quand ces derniers ont bloqué leur souffle, ils n'ont rien perçu. Mais dès qu'ils ont recommencé à respirer, ils se sont mis à sentir des effluves de menthe ou de citron, alors même qu'il n'y avait pas la moindre trace de ces odeurs dans l'air de la pièce !
Conclusion : pour que nous percevions consciemment des odeurs, il faut non seulement que des molécules odorantes se fixent sur les cils olfactifs qui tapissent le fond des cavités nasales (elles s'étaient ici échappées des vaisseaux sanguins très fins qui irriguent la muqueuse), mais aussi que ces cils soient agités par un flux d'air. Or avec les odeurs, la respiration offre un autre outil antistress efficace. D'abord, parce qu'elles ont une capacité incomparable à faire revenir des événements du passé en mémoire — on pense bien sûr à la célèbre madeleine de la littérature. En 2011, l'équipe du chercheur japonais Matsunaga Masahiro a montré que respirer une odeur qui évoque un souvenir agréable améliore l'humeur et calme l'anxiété.

La lavande aurait un pouvoir anxiolytique

Le second mode d'action des odeurs est qu'elles nous poussent inconsciemment à ralentir et amplifier la respiration — autrement dit à pratiquer la technique de la respiration lente, très apaisante —, comme l'a montré un autre chercheur japonais, Yuri Masaoka.
À condition qu'elles soient agréables ! Car respirer une mauvaise odeur fait, au contraire, accélérer le rythme respiratoire. Dans son étude, Yuri Masaoka l'a testé avec l'acide isovalérique, qui évoque un mélange d'aliment pourri et de transpiration…
Qu'en est-il des huiles essentielles, qui sont justement des concentrés de composés odorants ? Quelques études suggèrent que certaines, notamment celle de lavande, ont un pouvoir anxiolytique. Dans ces expériences, leur inhalation a fait baisser le stress dans tout une série de situations, allant de la séance de mots croisés en temps limité — proposée à des étudiants pour mimer l'anxiété de performance lors des examens — jusqu'à l'attente d'une intervention chirurgicale ou du passage chez le dentiste.
Toutefois, les méta-analyses sur le sujet ont des conclusions prudentes et soulignent le besoin de recherches complémentaires pour vraiment valider ce pouvoir.

FLORENCE AT / DIVERGENCE

L'activité physique améliore les capacités respiratoires. En outre, une pratique régulière développe la capacité des muscles à exploiter l'oxygène.

SPORT

Diminuer la sensation d'essoufflement

Environ 140 litres par minute : c'est la quantité d'air que nous parvenons à « pomper » quand nous faisons du sport — une quantité qui monte à plus de 200 litres par minute chez certains sportifs entraînés. Cela correspond à 20 fois plus que les quelque 7 litres par minute inspirés au repos. Est-il dès lors utile d'exercer les muscles qui actionnent les poumons ? Certaines études suggèrent qu'un tel entraînement améliorerait les performances dans les sports intermittents, comme le football, le rugby ou le basket, en diminuant la sensation d'essoufflement qui pousse à s'économiser plus que nécessaire. Un exercice classique consiste par exemple à respirer quelques minutes à travers une paille, nez bouché. Indépendamment de l'appareil respiratoire lui-même, l'entraînement sportif accroît la capacité de l'organisme à distribuer et exploiter l'oxygène, notamment parce que les vaisseaux sanguins qui irriguent les muscles se ramifient et que les mitochondries (les usines énergétiques des cellules) se multiplient.

tsunami qui a frappé l'Indonésie en 2004, la guerre du Viêtnam, des abus sexuels…

Enfin, en activant le système parasympathique et en bloquant les ruminations, les techniques respiratoires permettent de réduire le temps d'endormissement et le nombre de réveils en cours de nuit dans des contextes de stress. Des sessions quotidiennes de 10 à 30 minutes de respiration lente par le ventre avant d'aller dormir ont ainsi amélioré le sommeil d'infirmières intervenant pendant la pandémie de Covid-19 ou de sous-mariniers de l'armée chinoise.

Mais les techniques respiratoires ne servent pas qu'à surmonter des problèmes ponctuels ou déjà installés : elles représentent un moyen simple et sans risque d'entretenir sa santé mentale au quotidien. Pratiquées régulièrement, elles pourraient aider à diminuer le stress chronique, et ainsi participer à la prévention des pathologies favorisées par ce stress, comme les maladies cardio-vasculaires ou l'hypertension.

« *Des effets durables sur le bien-être physique et mental sont démontrés à partir de dix à quinze minutes de cohérence cardiaque par jour, réparties en deux ou trois séances de cinq minutes,* détaille Sophie Lavault. *Et plus on pratique, plus l'effet est fort. Mais il faut trouver un équilibre entre la contrainte et le bénéfice, sans quoi les patients abandonnent vite : cinq à dix minutes quotidiennes sont donc déjà un bon début*

pour s'approprier l'outil, avec un ressenti agréable immédiat. »
Reste que la validation scientifique doit se poursuivre. Dans une méta-analyse publiée en 2023, le chercheur britannique Guy Fincham et ses collègues ont trouvé que les techniques respiratoires diminuent le niveau de stress ressenti ainsi que les symptômes anxieux et dépressifs, mais ils avertissent aussi sur certains risques de biais. « *Il y a encore beaucoup de zones d'ombre sur la manière dont cela fonctionne,* abonde Sophie Lavault. *Pour moi, le plus important, c'est d'expérimenter et de trouver ses propres méthodes.* » Ce qui ne douche en rien l'enthousiasme de cette spécialiste : « *Les techniques respiratoires sont une porte ouverte vers la régulation des fonctions vitales, vers la régulation émotionnelle et cognitive : elles sont donc importantes, voire nécessaires, dans le domaine de la santé mentale au sens large. On devrait absolument l'apprendre à l'école !* »

Des recherches qui doivent être approfondies

Thomas Similowski insiste également sur la nécessité d'approfondir les recherches : « *Si le pouvoir antistress des techniques respiratoires est de mieux en mieux établi, beaucoup des études qui ont analysé leurs applications sont à petite échelle et mélangent ces techniques avec d'autres exercices, comme des postures de yoga, de sorte que leurs influences respectives sont parfois difficiles à démêler.* » Et de mettre en garde contre les sirènes du marketing, avec l'exemple d'une peluche en forme de loutre animée de mouvements respiratoires censée soigner… les chagrins d'amour ! Certes, une étude publiée en 2022 dans la revue *Plos One* a bel et bien montré que serrer dans ses bras un coussin animé de mouvements imitant une respiration lente atténue l'anxiété. Mais de là à dire qu'une loutre respirante a le pouvoir de réparer les cœurs brisés, il y a un pas que la science n'a pas — encore ? — franchi. ■ **G. J.**

MÉCANISME

Des techniques pour alléger la douleur

Migraines, mal de dos, articulations qui grincent… En France, près d'un adulte sur trois souffre de douleurs chroniques — et d'innombrables autres se blessent plus ponctuellement. Un fardeau considérable que les techniques respiratoires seraient susceptibles d'alléger. Spontanément, nous avons tendance à respirer plus vite lorsque nous avons mal. En évacuant en accéléré le dioxyde de carbone du sang, cette hyperventilation entraînerait une série de modifications neurochimiques à l'effet antalgique. D'où l'intérêt d'imiter ce mécanisme naturel : en 2023, le chercheur néerlandais Jelle Zwaag a montré avec ses collègues qu'une technique respiratoire incluant des phases d'hyperventilation atténue la douleur causée par un léger choc électrique. Mais l'exercice inverse serait également efficace : plusieurs études indiquent que la respiration lente et profonde diminue à la fois l'intensité de la peine et son impact affectif. Les mécanismes, variés, pourraient inclure une sorte de « brouillage cérébral » : le contrôle du souffle active en effet l'insula, une région du cerveau impliquée dans la perception des sensations corporelles, ce qui diminuerait l'activation de cette même zone par la douleur physique en raison d'un effet de compétition.

GARO/PHANIE

Spontanément, nous avons tendance à respirer plus vite lorsque nous avons mal, ce qui nous soulage. Mais les techniques de respiration lente fonctionnent aussi !

PAUL HOFMAN
DIRECTEUR DE L'INSTITUT HOSPITALO-UNIVERSITAIRE (IHU) RESPIRERA À NICE

« De nouveaux facteurs de risque favorisent les maladies respiratoires »

Certaines sont méconnues (la BPCO), d'autres ne sont pas reconnues comme telles (le cancer du poumon)... Les maladies respiratoires ont pourtant bel et bien des mécanismes communs. Le Pr Paul Hofman explique pourquoi il ne faut pas les sous-estimer.

Les maladies respiratoires constituent-elles une menace sous-évaluée ?
Leur incidence augmente chaque année de façon inéluctable. Et de façon très sournoise car les données épidémiologiques sont assez difficiles à maîtriser en temps réel. Mais, en tout cas, depuis une quinzaine d'années au moins, l'incidence de toutes les maladies respiratoires grimpe, partout dans le monde. Le cancer du poumon chez l'humain a certes marqué une petite stagnation, en partie grâce aux campagnes antitabac, mais la courbe semble repartir à la hausse, notamment en France, et en particulier chez les femmes. Ce qui fait dire que d'autres facteurs de risque, tels que la pollution atmosphérique, voire le réchauffement climatique, ont pris le relais. L'Organisation mondiale de la santé a d'ailleurs déclaré que la pollution était un carcinogène de type 1, comme le tabac. Dans dix ans, les maladies respiratoires seront sans doute la première cause de décès.

Vous mentionnez le réchauffement climatique comme facteur de risque. Comment agit-il concrètement ?
On n'a pas d'étude *in vitro* montrant qu'une augmentation de la température des cellules en culture provoque une transformation cancéreuse. Mais le fait d'avoir des microparticules dans l'atmosphère associé à une augmentation de la température fait que le rythme de la ventilation respiratoire s'accélère, et donc que le parenchyme pulmonaire [la partie comprenant les alvéoles et les tissus environnants] va se dégrader progressivement. En fait, tous ces facteurs se cumulent pour entraîner un traumatisme cellulaire qui induit progressivement une altération des poumons et de leur fonction.

Les mêmes facteurs de risque sont-ils impliqués dans toutes les pathologies respiratoires ?
À l'IHU, nous essayons de décloisonner ces différentes problématiques et maladies respiratoires. Dans l'asthme chronique, l'exposition aux allergènes combinée à la pollution atmosphérique et au réchauffement climatique est certainement responsable de l'augmentation de l'incidence des cancers pulmonaires. Quant à la BPCO (bronchopneumopathie chronique obstructive), le premier facteur de risque est le tabagisme, mais on s'aperçoit maintenant que nous avons de plus en plus de cas isolés liés aussi à la pollution atmosphérique. Le fait que l'on vieillisse, que l'on soit exposé plus longtemps à la pollution peut déclencher une BPCO, même si on n'a pas fumé. Nous savons depuis peu que certains types d'asthme prédisposent au cancer du poumon. En travaillant sur la mucoviscidose, qui est un type de sénescence cellulaire, on peut comprendre pourquoi une cellule normale devient sénescente, voire cancéreuse. Cette approche holistique est capitale pour identifier des mécanismes communs aux différentes maladies respiratoires.

BIO EXPRESS

- **1989 :** Docteur en médecine (Nice).
- **1993** Docteur en sciences (Montpellier).
- **1996 :** Professeur des universités (Nice).
- **2012 :** Directeur de l'équipe Inserm U1081 à l'Institut de recherche sur le cancer et le vieillissement (Nice).
- **2004 :** Chef de service du Laboratoire de pathologie clinique et expérimentale à l'hôpital Pasteur (Nice).
- **2023 :** Directeur de l'Institut hospitalo-universitaire RespirERA (Nice).

PHOTOPQR/NICE MATIN/CYRIL DODERGNY / MAXPPP

« Dans dix ans, les maladies respiratoires seront sans doute la première cause de décès »

Concernant le cancer du poumon, où en est-on du dépistage organisé ?
Un programme pilote national se met enfin en place. Toutes les preuves médicales montrent que nous serons capables de le détecter précocement en ciblant une population à haut risque de plus de 50 ans, qui a fumé un paquet par jour pendant plusieurs années. Mais a-t-on suffisamment de radiologues et de scanners pour pouvoir dépister tous les patients entrant dans cette catégorie ? Les autorités craignent que ça ne suive pas. De plus, le cancer du poumon touche plutôt des personnes modestes qui n'ont pas forcément accès à l'information et qu'il sera difficile de sensibiliser. Nous ne pouvons donc pas écarter le risque de ne pas atteindre la cible. Mais, ce dépistage est déjà installé depuis plusieurs années au Royaume-Uni, aux États-Unis, en Pologne, en Croatie… À Taïwan, il inclut même les non-fumeurs. Il faut dire que le cancer du poumon du non-fumeur, c'est la cinquième cause de mortalité par cancer dans le monde. Dans mon service, nous avons trois à quatre patients par semaine, n'ayant jamais fumé de leur vie, à qui on pose un diagnostic de cancer du poumon. Or, si on dépiste tous les plus de 50 ans, on ne risque pas un embouteillage mais un crash total. Pour le moment, l'examen repose sur un scanner thoracique, mais l'alternative ou l'approche combinée qui se développe, c'est la biopsie liquide. Et si tout va bien, le dépistage chez les anciens fumeurs sur tout le territoire sera déployé fin 2025.

Quant à la BPCO, les moyens sont-ils à la hauteur des enjeux de santé publique ?
Non ! Dans dix ans, ce sera probablement la troisième cause de mortalité dans le monde ! Il va falloir se retrousser les manches. Les gens ne savent pas ce qu'est cette maladie. Si tous les malades se déplaçaient dans la rue avec leur petit chariot et leur bouteille d'oxygène, on se rendrait compte de la fréquence de la BPCO et de son côté handicapant. Et je redoute l'apparition d'un nouveau profil : des malades de plus en plus jeunes qui développent la maladie autour de 40 ans. En fait, au vu de tous ces chiffres alarmants sur les maladies respiratoires, on n'en fait pas assez. À Nice, c'est la première cause d'hospitalisation. Donc si nous n'anticipons pas davantage, les conséquences pour la population et pour le système de santé seront terribles.

Dispose-t-on de pistes de traitement prometteuses ?
Extrêmement prometteuses ! Les thérapies ciblées ont déjà permis de faire des progrès considérables. Des malades souffrant d'un cancer du poumon avec des métastases au cerveau peuvent vivre dix à quinze ans. Cette médecine personnalisée est aussi une réalité pour ▸

les malades atteints de fibrose pulmonaire. Or, certaines d'entre elles sont de très mauvais pronostic, avec des espérances de vie ne dépassant pas six mois. Nous disposons également de traitements ciblés dans la mucoviscidose. Les patients sont stabilisés et peuvent reprendre le sport. Dans quelques années, on peut espérer vivre avec cette maladie comme avec un asthme.

La chirurgie minimale invasive a également permis de faire de belles avancées. Grâce à la robotique, des lésions de très petite taille sont extraites le matin et le patient sort le soir, là où il y a quelques années, nous pratiquions une ablation d'un des lobes du poumon. En ce qui concerne la BPCO, plusieurs approches

« Nous développons des biomarqueurs qui identifient le vieillissement pulmonaire »

thérapeutiques sont actuellement envisagées, hormis les approches diététiques et de sevrage tabagique, ciblant les anomalies métaboliques et inflammatoires chroniques associées à cette maladie.

Mais le plus gros progrès, nous le devons à l'intelligence artificielle (IA). Les outils de « radiomique » permettent progressivement d'identifier des personnes à risque de développer un cancer du poumon alors qu'aucun nodule pulmonaire n'est présent à la radio. L'IA repère des lésions et des assemblages d'images et de signaux qui ne sont pas visibles par l'œil du radiologue. Et dans ce cas, il existe des traitements préventifs permettant d'intercepter le développement d'un cancer pulmonaire quand il en est encore temps. Nous en sommes pour l'instant au stade des essais cliniques mais l'avenir, c'est ça.

Que manque-t-il pour faire vraiment reculer les maladies respiratoires ?

À l'heure où l'IA ouvre des perspectives, nous manquons toujours de données de qualité, structurées, offrant une bonne puissance épidémiologique. Par ailleurs, ne croyons pas que l'IA va remplacer l'expertise humaine. Notre institut hospitalo-universitaire, qui concentre en un seul lieu les efforts de recherche, d'enseignement et de soins attire aussi les jeunes talents. Et depuis trois ans environ, les internes choisissent de plus en plus la pneumologie. Mais, nous devons mettre le paquet pour sortir de notre sous-effectif. Et même au sein de l'IHU, nous ne pouvons pas travailler seuls. Les collaborations avec des grands centres de recherche à l'international sont essentielles. Notamment pour notre projet actuel sur le vieillissement pulmonaire. Nous sommes en train de développer des biomarqueurs qui dissocient votre âge physiologique de votre âge biologique. À 40 ans, on peut avoir un poumon de quelqu'un de 80 ans et inversement. Avec ce biomarqueur de sénescence, nous espérons mettre au point un test qui pourrait être utilisé en cancérologie. Au-delà de 70 ans, nous avons tendance à ne pas proposer de chimiothérapie, uniquement sur le critère de l'âge. C'est quand même terrible. Alors que le patient est peut-être tout à fait en capacité de la supporter. Et l'IA va là aussi jouer un rôle déterminant, en nous aidant dans la stratification des décisions thérapeutiques. ■

Propos recueillis par C. C.

SYSTÈME VASCULAIRE

L'impact caché du manque d'oxygène

Les 50 000 habitants de la Rinconada, au Pérou, vivent à 5300 mètres d'altitude. Leur organisme s'est habitué à ces conditions de vie extrême. Mais jusqu'où ? C'est pour le savoir qu'une équipe de l'Inserm, de l'université Grenoble Alpes et du CHU Grenoble Alpes a lancé l'Expédition 5300. En 2023, les premières constatations sur les enfants montrent une croissance cérébrale normale pour la majorité, malgré des acquisitions motrices et langagières plus tardives. En octobre 2024, l'équipe publie de nouveaux résultats : l'adaptation de l'organisme a ses limites ! En effet, à une telle altitude, les vaisseaux sont dilatés en permanence, ce qui les rend moins réactifs lorsqu'ils ont besoin de souplesse pour faire face à une activité physique ou résister au froid. De plus, l'inflammation et les dommages causés par les radicaux libres augmentent, ce qui met à mal les vaisseaux. De telles conditions peuvent mener à des complications de santé (hypertension ou insuffisance cardiaque). Ces mécanismes observés dans les Andes devraient aider à mieux décrypter des maladies cardio-vasculaires ou respiratoires, présentes sur tout le globe, qui se caractérisent par un apport réduit en oxygène.

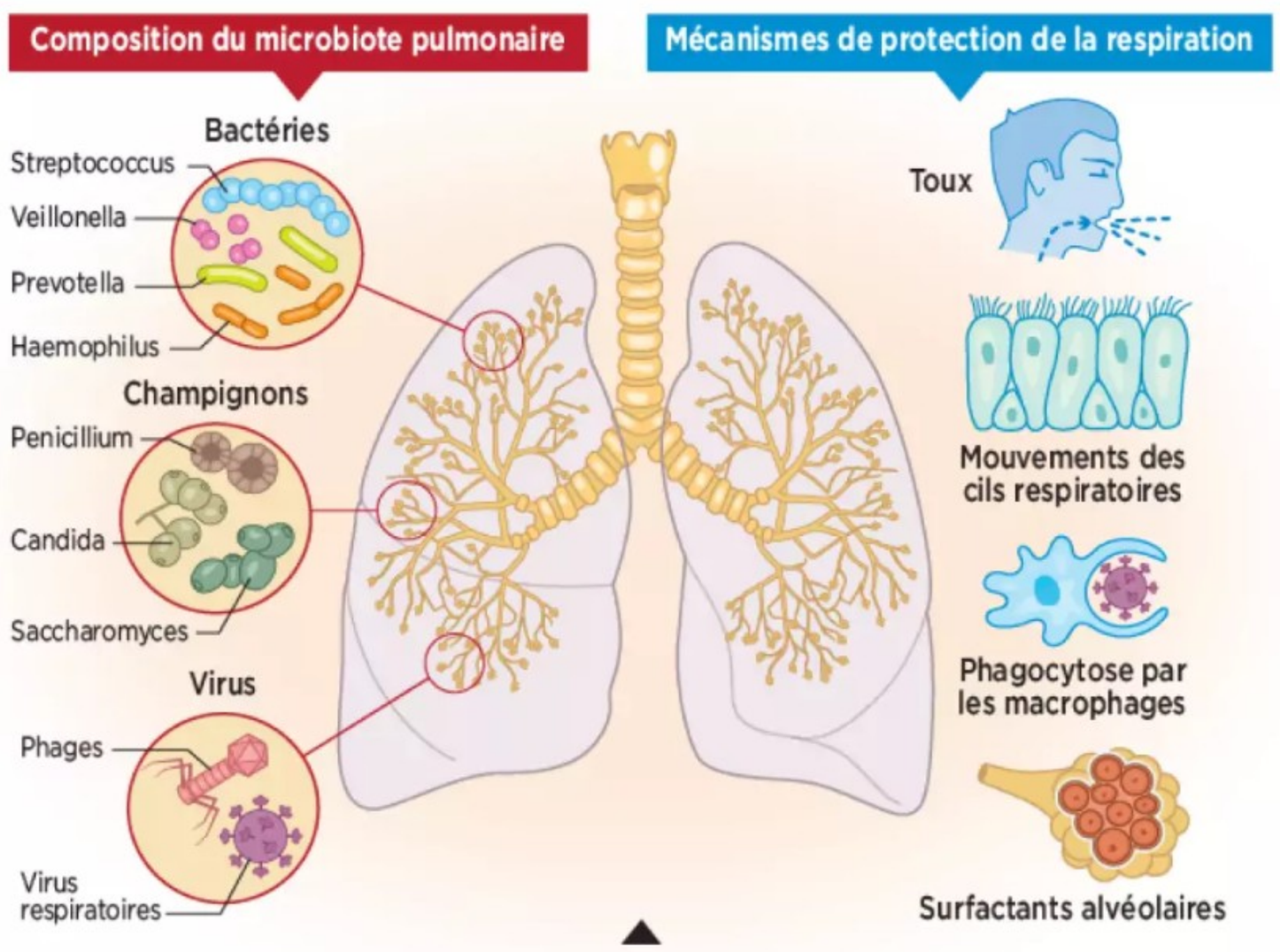
AGENCE PERCEPTION/AXEL PITTET

L'insuffisance cardiaque est un des risques de la vie en haute altitude (ici lors de l'Expédition 5300).

À la découverte du microbiote pulmonaire

On a longtemps cru les poumons stériles. Pourtant ils abritent des bactéries, des virus, des champignons. Ce microbiote très protégé commence à dévoiler ses secrets.

Les dogmes en médecine ont la vie dure. Ainsi, « *nous avons longtemps cru qu'un poumon sain était forcément stérile* », reconnaît le Pr Geneviève Héry-Arnaud, bactériologue spécialiste du microbiote pulmonaire au CHU de Brest. Pourtant, en 1899, des travaux étaient venus contredire ce qui allait devenir un dogme. Une étude sur 23 cadavres exempts de maladie pulmonaire avait révélé la présence de bactéries dans les voies respiratoires. « *La seule erreur de cette étude par ailleurs originale fut de conclure que les bactéries étaient pathogènes* », indique-t-elle. Alors qu'il s'agissait de bactéries commensales, qui vivent en harmonie avec le sujet. Il faudra attendre le début des années 2000 et l'avènement des techniques de séquençage de l'ADN pour accepter ce que l'on pensait inconcevable : la flore pulmonaire existe bel et bien. Pour la première fois, en 2010, des chercheurs de l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni) concluent que « *l'arbre bronchique contient un microbiote caractéristique* ».



L'arbre bronchique contient un microbiote spécifique, composé de plusieurs familles de micro-organismes, et des mécanismes de défense pour empêcher l'infection bactérienne.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE: NATURE

Un rôle primordial pour notre immunité

Si cette croyance a tenu aussi longtemps, ce n'est pas un hasard. En effet, les quelque 100 m² de surface pulmonaire, avec leurs bronches, bronchioles et autres alvéoles, sont dotés de puissants mécanismes de défense pour maintenir une faible charge microbienne et empêcher les infections. Les voies respiratoires sont constamment nettoyées par les cils qui déplacent le mucus vers la gorge, et des cellules immunitaires comme les macrophages éliminent rapidement les bactéries. De plus, l'exploration de ce microbiote exige des méthodes nettement plus invasives que pour le microbiote intestinal. « *Nous avons recours à des lavages broncho-alvéolaires* [introduction d'un liquide stérile dans une partie des poumons puis récupération de ce liquide pour analyse] *ou à des brossages bronchiques* [utilisation d'une petite brosse pour collecter des échantillons directement sur les voies respiratoires supérieures ou inférieures], explique Geneviève Héry-Arnaud. *Évidemment, cela ne se pratique pas sur des sujets sains.* » Quant aux expectorations, elles permettent certes de collecter du mucus de façon plus douce, mais les sécrétions sont parfois contaminées par le microbiote salivaire. Et la quantité de micro-organismes venus des voies aériennes supérieures qui passent dans le poumon demeure un mystère. Rien d'étonnant donc à ce que la renommée du microbiote respiratoire n'arrive pas à la cheville de son homologue

intestinal. Cependant, *« le nombre de publications scientifiques consacrées à ce microbiote a beaucoup augmenté ces dix dernières années,* souligne le Pr Jean-François Timsit, chercheur à l'Inserm. *Et même si elles ne disent pas toutes la même chose, nous avons tout de même quelques éléments. »*

Premier constat : la population microbienne dans les poumons est de l'ordre de 10^5, contre 10^{11} dans nos intestins. Deuxième constat : l'essentiel des micro-organismes se trouve dans les bronches. *« Dans le tissu pulmonaire, du signal bactérien a bien été trouvé mais nous n'avons pas la preuve que ces bactéries sont vivantes »*, précise Geneviève Héry-Arnaud. Toutes les familles de micro-organismes sont malgré tout présentes dans ce microbiote : bactéries, virus, champignons et archées. Il se distingue aussi par sa forte biodiversité. Mais, le plus surprenant est qu'environ la moitié des espèces bactériennes présentes sont anaérobies [elles se développent en l'absence d'oxygène]. Si de telles bactéries se nichent dans l'organe de la respiration, cela prouve que les poumons peuvent être colonisés par des micro-organismes provenant notamment d'autres microbiotes (oropharyngé et intestinal).

Troisième certitude : le microbiote pulmonaire joue un rôle primordial dans notre immunité. À l'instar de la flore intestinale, il stimule et éduque les cellules immunitaires. Les micro-organismes commensaux occupent l'espace, produisent des substances antimicrobiennes et empêchent les pathogènes de s'installer. De plus, il module la réponse immunitaire pour éviter une inflammation excessive, par exemple lorsque les voies respiratoires sont exposées à des allergènes. *« Quelques études ont également montré que ce microbiote influence l'architecture des poumons, le nombre d'alvéoles et donc la capacité respiratoire »*, précise Geneviève Héry-Arnaud.

J.B. QUENTIN/LE PARISIEN/MAXPPP

« Il existe une relation entre la gravité d'une pneumonie et la diversité du microbiote »

Jean-François Timsit, chercheur à l'Inserm, cofondateur du projet Phenomenon

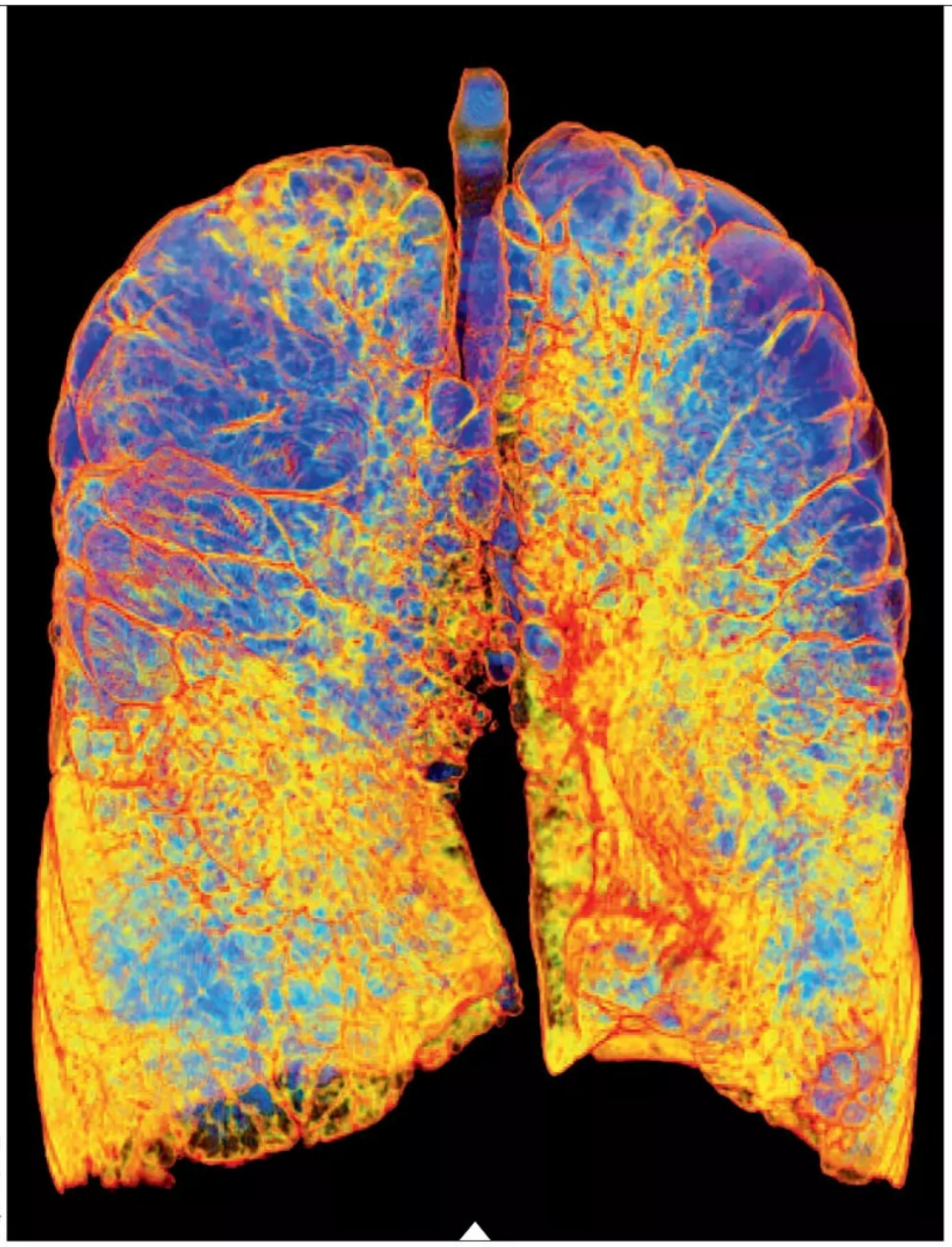
Les risques d'un microbiote pulmonaire déséquilibré

Enfin, comme n'importe quel microbiote, il peut se retrouver en dysbiose. À l'origine de ce déséquilibre, on peut trouver plusieurs facteurs. Des facteurs environnementaux tout d'abord, tels que le tabac, qui altère la composition et la diversité de la flore, irrite les voies respiratoires et réduit l'efficacité des mécanismes de défense pulmonaires. Mais aussi la pollution de l'air, qui risque d'affecter l'intégrité de la barrière pulmonaire. Un usage important et précoce des antibiotiques *« fait aussi des dégâts »*, ajoute-t-elle. Les infections respiratoires, comme la grippe, modifient également la composition du microbiote en éliminant les bactéries bénéfiques et en permettant aux micro-organismes pathogènes de se multiplier, ce qui peut aggraver l'inflammation. D'ailleurs, *« il existe une relation entre la gravité d'une pneumonie et la diversité du microbiote »*, souligne Jean-François Timsit. Quelle relation précisément ? Quels micro-organismes sont sur le banc des accusés ? L'analyse du microbiote permettrait-elle de prédire l'efficacité des traitements ? Toutes ces questions agitent la communauté scientifique. Une étude parue en 2020 dans l'*American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, menée

ORGANOÏDE

Les grands espoirs du poumon miniature

Les animaux de laboratoire ne sont pas d'une grande aide pour étudier les poumons. En effet, les modèles actuels ne reflètent pas bien les poumons humains, qui ont une structure complexe et qui fonctionnent dans un environnement où l'air et le liquide interagissent. Des chercheurs de l'Inserm ont donc créé un modèle de poumon miniature en 3D, appelé bronchioïde. Il ressemble aux bronches humaines : *« Le grand défi était de parvenir à générer une structure cylindrique tubulaire pour que les organoïdes pulmonaires commencent à ressembler à des bronchioles »*, explique Isabelle Dupin, professeure de physiologie au Centre de recherche cardio-thoracique de Bordeaux. Ce petit bijou contient des cellules pulmonaires humaines ciliées et productrices de mucus dans lequel on peut introduire de l'air, du liquide ou des virus pour reproduire des maladies comme la broncho-pneumopathie chronique (BPCO). Et, à terme, tester de nouveaux médicaments.



SPL/SUCRÉ SALÉ

Scanner des poumons d'un fumeur présentant un emphysème, une complication de la broncho-pneumopathie chronique (en bleu les parties atteintes).

chez 91 patients admis en soins intensifs pour toutes sortes de pathologies, a par exemple mis en évidence que les malades avec une charge bactérienne pulmonaire plus élevée passaient plus de jours sous ventilation mécanique. La présence de bactéries intestinales dans les poumons était en outre de mauvais pronostic. Bien que préliminaires, ces résultats donnent de l'espoir aux auteurs de l'étude, pour qui *« les différences dans les bactéries pulmonaires aident à expliquer qui se rétablit et qui ne se rétablit pas. Et si nous ne pouvons pas modifier les gènes de nos patients, nous pouvons réguler leur microbiote. »*

Au-delà du pronostic, d'autres perspectives d'application émergent. Au CHU de Brest, en collaboration avec une équipe Inserm de l'université de Bretagne occidentale, un biomarqueur du microbiote pulmonaire permettant de prédire le risque d'infection pulmonaire chez les malades atteints de mucoviscidose a été identifié. *« Nous avons déposé un brevet et espérons valider ce test pour la fin 2026, à l'issue d'une vaste étude clinique qui est en cours,* déclare Geneviève Héry-Arnaud. *Les enfants à risque pourraient alors bénéficier d'une thérapie ciblée de manière précoce. »*

Enfin, une cartographie très précise du microbiote pulmonaire pourrait aussi, à terme, offrir des pistes de traitement, notamment pour les pneumonies bactériennes. L'enjeu est de taille, car du fait de la résistance aux antibiotiques, un tiers des 500 000 cas traités chaque année à l'hôpital aboutissent à un échec thérapeutique. Et les infections à pneumocoques présentent un taux de mortalité de 10 à 30 % selon les études. L'issue pourrait-elle venir du microbiote pulmonaire?

Des pneumonies liées à une baisse de certaines bactéries

Des travaux publiés en 2023 dans *Nature medicine* par une équipe du CHU de Nantes ont déjà montré que la réduction de l'abondance de quatre types de bactéries était liée à des pneumonies graves nécessitant une assistance respiratoire. *« Maintenant que nous avons identifié ces espèces, nous allons étudier les fonctions métaboliques qu'elles assurent et la façon dont elles fluctuent avec le devenir clinique du patient »*, explique Jean-François Timsit, qui a cofondé en 2023 ce projet nommé Phenomenon.

En janvier, les inclusions de quelque 600 patients souffrant de pneumonies légères ou sévères vont commencer. À partir des échantillons prélevés, les chercheurs vont décrire en détail le contenu et les propriétés des gènes de résistance dans le microbiote des patients et évaluer la possibilité que ces gènes présents dans les bactéries du microbiote pulmonaire soient transmis aux bactéries pathogènes. Ce qui expliquerait les échecs de traitement. Ensuite, ces bactéries commensales naturellement résistantes aux antibiotiques pourraient être utilisées comme probiotique. La stratégie peut paraître contre-intuitive mais lors d'une antibiothérapie, le traitement détruit non seulement les bactéries pathogènes mais aussi celles qui protègent le microbiote. En introduisant ces bactéries commensales, il serait alors possible de protéger le microbiote tout en traitant l'infection. **C. C.**

La lumière bleue des écrans n'affecte pas le sommeil

L'exposition chronique aux LED des smartphones et tablettes a longtemps été soupçonnée de retarder l'endormissement. Mais de récents travaux montrent que l'effet de la lumière bleue sur le cerveau ne serait que très limité.

« *Écrans et lumière bleue, ce qu'il faut savoir. L'exposition à la lumière bleue des écrans stimule fortement les récepteurs de la rétine, envoyant de fait à l'horloge biologique un signal "de jour" qui retarde l'endormissement […]* » Cet avertissement de l'Institut national du sommeil et de la vigilance ne laisse aucun doute sur le coupable. Associée à l'augmentation du temps d'écran — 32 heures en moyenne par semaine selon l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) —, la lumière bleue nous maintient éveillés et perturbe notre sommeil. Si cette croyance s'est largement répandue auprès du grand public, plusieurs études récentes laissent à penser qu'elle ne repose guère sur des faits scientifiques.

La lumière bleue constitue toute une partie du spectre de la lumière visible, avec une longueur d'onde entre 380 et 500 nanomètres. Les travaux sur ses possibles effets démarrent bien avant l'apparition des smartphones et des tablettes. Dès 1999, Russell Foster, professeur de neurosciences spécialisé dans le rythme circadien à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), découvre que les cellules oculaires sont bien capables de capter la lumière, et *a fortiori* la lumière bleue : « *Nos travaux sur des souris, et d'autres études par la suite sur le rat, ont montré qu'un petit nombre de cellules du ganglion de la rétine — environ 1 % — répondaient directement à la lumière,* raconte-t-il. *Nous avons appelé ces photorécepteurs les "cellules ganglionnaires rétiniennes photosensibles", des pRGC. Elles forment une "toile photosensible" dans l'œil, capturant la lumière de toutes les directions afin de mesurer la luminosité ambiante.* »

Captée par nos yeux, la lumière a des effets sur notre cerveau, quelle que soit la longueur d'onde. Dans les années 2000, plusieurs études démontrent que l'exposition à la lumière en fin de journée et en soirée décale notre rythme circadien. L'endormissement se fait plus tard et le réveil intervient également plus tard le lendemain matin. À l'in-

RUSSELL FOSTER

« Rester 30 minutes à la lumière crue des spots de sa salle de bains avant de se coucher est plus négatif que de consulter son portable »

Russell Foster, professeur de neurosciences spécialisé dans le rythme circadien à l'université d'Oxford (Royaume-Uni)

SAPOZHNIK/ GETTYIMAGES

Si les écrans émettent bien une lumière bleue, qui stimule des cellules photosensibles de la rétine et peut faire baisser le niveau de mélatonine, ce n'est pas pour autant qu'elle provoque des insomnies, selon des études.

verse, la lumière du matin fait avancer notre rythme circadien. On va plus tôt au lit et on se lève ensuite plus tôt le lendemain.

Les travaux de Russell Foster vont même plus loin : l'activité des pRGC provient d'une molécule (un photopigment) sensible à la lumière bleue, la mélanopsine. *« Dans plusieurs expériences clés, notre groupe a montré que la mélanopsine et les pRGC sont extrêmement sensibles à la lumière bleue chez tous les animaux, y compris les humains. Probablement parce qu'ils agissent comme détecteur de l'obscurité »*, précise le chercheur. Durant le jour, le ciel est dominé par la lumière du soleil, composée de tout le spectre visible, de violet à rouge. Quand le soleil se couche, le ciel se divise. L'horizon est bordé d'une fine couche de rouge et d'orangé. Partout ailleurs dans le ciel, la lumière bleue domine. C'est ce qu'on surnomme « l'heure bleue ». *« Nous supposons que les pRGC sont sensibles à la lumière bleue parce qu'elle est dominante au lever du soleil et à son coucher. C'est donc une cible idéale pour bien comprendre où l'on se situe dans la journée. »*

Un endormissement décalé d'une dizaine de minutes

Et pourtant, aucun lien de cause à effet n'a pu être établi, jusqu'à présent, entre la lumière bleue de nos écrans et l'insomnie ! Les appareils — ordinateurs, tablettes, smartphones — émettent bien une lumière plus ou moins enrichie en lumière bleue, ce qui stimule les pRGC. Mais aucun lien significatif avec l'endormissement. L'une des études phares sur le sujet, menée par l'université Harvard (États-Unis) en 2014, porte sur l'utilisation de tablettes électroniques, qui sont rétroéclairées. Les participants ont été maintenus toute la journée dans la lumière tamisée, à environ 90 lux (l'unité de mesure de la lumière), puis on leur a fait lire un livre sur une tablette pendant quatre heures d'affilée, avec une luminosité maximale, durant cinq jours de suite. Les résultats ont montré que l'endormissement n'était décalé que d'une dizaine de minutes. En parallèle, ils ont remarqué un effet sur la mélatonine, souvent considérée comme l'hormone du sommeil. *« C'est vrai que cette expérience a fait baisser le niveau de mélatonine des participants. Mais l'endormissement n'a pas été perturbé. De la même façon, il n'existe aucune preuve que l'utilisation toute la jour-*

née de filtres de lumière bleue, comme on peut en télécharger facilement sur Internet, ait un impact sur le rythme circadien », précise Russell Foster.

La coupable serait la lumière tout court, même tamisée

En France aussi, un rapport de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) publié en mai 2019 indique que « *le niveau de risque associé à une exposition chronique à des LED riches en bleu ne peut être évalué à ce jour* ». Et les lunettes anti-reflets bleus, proposées chez les opticiens ou sur Internet, n'auraient aucun effet bénéfique, selon la plus grosse méta-analyse réalisée en 2023 sur le sujet par le réseau Cochrane *(lire l'encadré ci-dessous)*. La coupable ne serait pas la lumière bleue spécifiquement, mais la lumière tout court ! L'exposition en soirée à de la lumière de manière générale, qu'elle soit bleue ou non, suffit à perturber le rythme circadien. Et ce, même lorsqu'elle est tamisée. Des souris exposées à 20 lux pendant quatre heures d'affilée en soirée voient leur rythme circadien perturbé, selon une étude publiée dans les *PNAS* en 2021. « *La lumière tamisée en soirée correspond à une extension artificielle de la lumière du jour, augmente la vigilance avant le coucher, ce qui recule la sécrétion de mélatonine et le début du sommeil* », écrivent les auteurs. Lumière assez forte, lumière tamisée… Pas facile de savoir à quoi renvoient objectivement ces dénominations. D'autant que l'éclairage intérieur est propre à chacun de nos logements. Pour comparer les différents environnements durant la journée, on peut par exemple télécharger une application sur le smartphone destinée à mesurer le nombre de lux dans la pièce. Une pièce ensoleillée, près de la fenêtre, correspond à environ 3000 lux. En s'éloignant de la fenêtre, les lux baissent de quelques centaines d'unités. En revanche, l'éclairage dehors au soleil monte à 40 000 lux ! « *Finalement, il faut se méfier de l'exposition à la lumière tout court. Avez-vous remarqué que juste avant d'aller au lit, nous faisons un tour dans la pièce où la lumière est la plus forte et la plus intense de tout notre logement, la salle de bains ? Rester trente minutes à la lumière crue des spots de sa salle de bains avant d'aller se coucher est bien plus négatif que de consulter son portable* », prévient Russell Foster.

Une distinction entre utilisations passive et active des écrans

De là à dire que les écrans peuvent être utilisés à volonté en soirée… Tout dépend de la façon dont ils sont employés. « *Ce n'est pas la même chose si l'on regarde une vidéo de façon passive ou si l'on est actif. Une étude de l'université d'État de Pennsylvanie* [États-Unis] *a montré en 2023 qu'aller sur les réseaux sociaux, jouer à un jeu vidéo, ou encore traiter ses mails renforçait l'éveil cérébral des participants et retardait l'endormissement* », étaie Russell Foster. En journée, cela se traduit par une forte envie de dormir et des performances moins bonnes. Adieu le stress du travail ou l'effet galvanisant des réseaux sociaux… Il faut aussi être dans le bon état d'esprit avant d'aller se coucher. De trente minutes à deux heures avant de se mettre au lit, la priorité est aux activités douces qui favorisent la détente. Et surtout, on évite les lumières trop crues qui viendraient chatouiller les récepteurs pRGC au mauvais moment. ■ **Coralie Lemke**

OPHTALMOLOGIE

Les lunettes anti-reflets bleus, un gadget inutile ?

Souvent proposées chez les opticiens ou sur Internet, les lunettes anti-reflets bleus ne serviraient à rien, selon la plus large étude jamais réalisée à ce sujet, publiée en 2023. C'est la conclusion tirée par Cochrane, une organisation à but non lucratif indépendante, qui a passé au crible 17 essais cliniques randomisés, réalisés dans six pays différents. « *Cette association reste controversée. Il y a un manque de preuves directes. Aucun mécanisme biologique clair par lequel la lumière bleue pourrait causer directement une fatigue oculaire n'a été identifié* », explique le Dr Laura Downie, de l'université de Melbourne (Australie), auteure de ces travaux. C'est pourquoi les médecins indépendants de Cochrane affirment « *ne pas soutenir* » la prescription de verres qui filtrent la lumière bleue dans la population générale. Pire, si la promesse des opticiens et des compagnies est de réduire jusqu'à 40 % la lumière bleue perçue par les yeux devant un écran, ces lunettes n'en filtrent que 10 à 25 %.

HÉLIN LOÏK-TOMSON / GETTY IMAGES

Les verres censés protéger de la lumière bleue des écrans, non seulement n'en filtrent que 10 à 25 %, mais n'auraient aucun effet sur le sommeil.

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS SCIENCES ET AVENIR

DE LA PRÉVENTION AUX SOINS

Le guide de la santé

Alimentation • Sommeil
Activité physique • Dépistage
Télémédecine • Automédication
Bilans • Vaccins...

ARNAUD MEYER/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

« Les progrès de la médecine ne cessent de s'accélérer. Nous vivons une révolution qui donne le vertige »

Jean-Pierre Thierry, médecin de santé publique

SE SOIGNER : LES BONS RÉFLEXES À TOUS LES ÂGES

en vente en kiosque

AURÉLIEN TROISOEUFS
ANTHROPOLOGUE

L'anthropologue, son balai et la psychiatrie

Aurélien Troisoeufs, directeur du laboratoire de recherche en santé mentale, sciences humaines et sociales à Paris, a d'abord travaillé comme agent de service au sein d'une unité psychiatrique avant de passer sa thèse, et le revendique. Portrait de ce chercheur atypique.

À regarder les petites briques d'un jeu de construction et les figurines de fourmis égayant son bureau, on ne penserait pas qu'on fait face à l'un des rares anthropologues de la santé à diriger un laboratoire au sein d'un hôpital français. Pour l'institution, l'objectif est de « prendre la température » des patients et des soignants. Mais l'anthropologie vise à éclairer ce qui façonne leurs expériences, comment le soin déborde du traitement, à révéler l'humain derrière le malade.

Pour cela, il faut savoir jouer des apparences, et c'est une spécialité d'Aurélien Troisoeufs. « *Il n'en a pas l'air, pourtant il est sérieux* », rassure Iannis McCluskey, son binôme de recherche et pair-aidant, une personne ayant un vécu de la psychiatrie et qui s'en sert en tant que professionnel de la santé mentale. Cette fantaisie est une arme pour l'anthropologue. « *Dans le milieu soignant, l'approche "molle" des sciences humaines et sociales n'est pas perçue comme menaçante* », souffle Iannis McCluskey. Face à lui, Aurélien Troisoeufs s'en amuse : « *L'anthropologie est une science flasque, elle passe sous toutes les portes.* » Et pour s'en assurer, le chercheur n'a pas hésité à prendre le balai.

BIO EXPRESS

5 septembre 1984 : Naissance.

2002 : Agent de service hospitalier au Centre hospitalier d'Argenteuil.

2012 : Soutient sa thèse « Le passage en actes : du malade mental à la personne liminaire. Anthropologie des associations d'usagers de la psychiatrie ».

2024 : Directeur du laboratoire de recherche en santé mentale, sciences humaines et sociales du GHU Paris psychiatrie et neurosciences.

En 2002, encore étudiant, il travaille comme agent de service hospitalier (ASH) dans le service de psychiatrie du Centre hospitalier d'Argenteuil, en banlieue parisienne. En marge de ses diplômes, il acquiert une expérience professionnelle de ménage en milieu hospitalier, et pas seulement. « *J'ai été élevé à la psychiatrie par les ASH* », revendique aujourd'hui l'anthropologue, car ce premier métier a formé son regard sur une institution stigmatisée et méjugée. À l'hôpital, les ASH bénéficient d'une position singulière. Contrairement aux autres personnels des services, ce ne sont pas des soignants. « *Les personnes qui font le ménage ont un contact particulier avec les patients, c'est de l'intime sans enjeu de soins, une relation très authentique* », abonde Zohra Baarir, psychiatre dans le service qui accueillit Aurélien Troisoeufs pendant ses études. « *Dans la hiérarchie hospitalière, ces emplois les moins valorisés sont appelés "dirty jobs" par les sociologues* », explique Anne Lovell, anthropologue de la santé à l'Inserm et directrice de thèse d'Aurélien Troisoeufs. « *Je suis d'abord un ASH, ce "sale boulot" est la voie royale pour l'anthropologie* », résume le chercheur.

L'observation participante, pierre d'angle du chercheur

« *Je me souviens d'Aurélien avec le balai, il était curieux de tout, il observait et interagissait avec tout le monde* », évoque Zohra Baarir. Ce sont peut-être les débuts de l'observation participante que le jeune chercheur met en place. Il a ensuite travaillé sur l'éducation thérapeutique, les aménagements des services d'hospitalisation ou encore les groupes d'entraide mutuelle (GEM) — des associations socioculturelles de personnes concernées par des situations de handicap ou des troubles psychiques. L'observation participante

PATRICIA LECOMPTE / SIGNATURES-POUR SCIENCES ET AVENIR

commence par la rencontre informelle des acteurs, en s'engageant dans leurs activités, en cuisinant avec le groupe, ou encore lors d'un atelier de peinture. L'anthropologue cultive un regard néophyte, collecte des observations et des ressentis avant de déployer des entretiens formalisés. Étienne Bertrand était infirmier dans le service du groupe hospitalier universitaire (GHU) dans lequel Aurélien Troisoeufs a étudié la création d'« un espace d'apaisement », un lieu au sein du service où le patient peut engager des activités ou s'installer pour prévenir les crises et éviter le recours à l'isolement. « *La présence d'Aurélien est active,* décrit Étienne Bertrand. *Il y a beaucoup d'interactions avec l'équipe et les patients. Il m'a aidé à prendre conscience qu'il y a des phénomènes implicites en psychiatrie.* »

L'inspiration ? Le sociologue Jean Peneff. Celui-ci a travaillé pendant plusieurs années comme brancardier bénévole dans un service d'urgence. Il en a décrit les conditions de travail ainsi que la catégorisation dans laquelle les soignants inscrivent les patients — « sérieux », « habitués », « gentils » ou « râleurs ». Mais nulle imitation. Anne Lovell se souvient : « *Aurélien avait un regard d'en bas, sans être complexé. Il a produit un travail de terrain singulier et enraciné dans la littérature.* » Contrairement à Jean Peneff, l'organisation n'est pas le sujet d'Aurélien Troisoeufs. Il développe une anthropologie de la personne telle qu'elle a été proposée par Marcel Mauss, père de l'anthropologie française, dans laquelle le terrain est l'humain.

Une curiosité qu'il déploie vers d'autres questions de santé

Si la psychiatrie est son terrain naturel, Aurélien Troisoeufs a déployé sa curiosité vers d'autres questions de santé. Il a étudié des patients souffrant de la maladie de Parkinson auxquels les médecins proposaient de la neurostimulation profonde, un implant activant électriquement des régions du cerveau, et des patientes de chirurgie bariatrique, un traitement de l'obésité. Au cours de ces pas de côté, c'est souvent le concept de normalité, essentiel en psychiatrie, qu'il a exploré autrement. « *Les femmes qui font de la chirurgie bariatrique sont des ethnographes de la normalité* », assure-t-il. Si les personnes ayant un vécu psychiatrique sont stigmatisées et souvent réduites à leur diagnostic, on retiendra des travaux d'Aurélien Troisoeufs qu'elles possèdent des savoirs et des connaissances intéressantes pour la société. Le partage de ces ressources est d'ailleurs l'objet des groupes d'entraide mutuelle. Ce sont aussi ces expériences qui rendent précieux l'emploi des pairs-aidants au sein des équipes soignantes.

À tout juste 40 ans, l'anthropologue va porter la voix des sciences humaines et sociales dans le GHU Paris psychiatrie & neurosciences, en dirigeant le seul laboratoire de sciences humaines et sociales de l'institution. Un défi, reconnaît son collègue Iannis McCluskey. « *Les soignants ont parfois peur d'un manque de scientificité dans nos approches. De leur point de vue, l'étude qualitative est facile. Seules les études quantitatives sont reconnues comme sérieuses* ». Comptons sur le goût de l'émulation d'Aurélien Troisoeufs pour changer ce regard. ■

Agnès Vernet

« Dans le milieu soignant, l'approche "molle" des sciences humaines et sociales n'est pas perçue comme menaçante »

Iannis McCluskey, pair-aidant au GHU Paris psychiatrie & neurosciences

Le régime méditerranéen, star des menus

Les effets positifs de ce régime sur la santé ne sont plus à démontrer, grâce à ses apports en fibres, en vitamines, en acides gras de qualité et en antioxydants.

Le régime méditerranéen résiste à l'épreuve du temps. Pour la septième année consécutive, le magazine américain *US News & World Report* l'a classé comme le meilleur régime alimentaire de l'année 2024, devant les régimes **Dash** et **Mind**. Les études les plus récentes confirment ses bénéfices pour la santé, grâce à ses apports en fibres, vitamines, acides gras de qualité et en pigments végétaux **antioxydants**. Tour d'horizon.

Un régime axé sur les végétaux

Céréales complètes (orge, riz, etc.) ; légumes secs (pois chiches, haricots blancs, etc.), sources de fibres et de minéraux (cuivre, acide folique, fer, magnésium, zinc) ; fruits, légumes et herbes (basilic, thym, etc.), riches en antioxydants et en vitamines ; fruits à coque (noix, amandes, noisettes) pourvus d'acides gras insaturés, le régime méditerranéen fait la part belle aux végétaux. La viande y tient peu de place (deux à trois fois par semaine). Poissons, fruits de mer, volailles et œufs sont préférés à la viande rouge (bœuf, veau, porc, etc.), consommée seulement trois à quatre fois par mois. Les produits laitiers de brebis et de chèvre sont aussi préférés à ceux de vache, tandis que l'huile d'olive est la principale source de matières grasses, remplaçant ainsi les graisses saturées comme le beurre. Toutefois, le régime méditerranéen ne se résume pas à une simple liste d'aliments. Il s'agit d'un mode de vie global, qui comprend notamment la prise des repas en commun.

30 g

La quantité de fruits à coque à consommer chaque jour, ainsi que deux produits laitiers et au moins une céréale complète.

SOURCES : SOCIÉTÉ EUROPÉENNE DE CARDIOLOGIE, PNNS.

Il prévient le diabète

Sa richesse en fibres, polyphénols, acides gras poly-insaturés de type oméga-3 et la faible présence de produits sucrés et transformés sont autant de facteurs favorables à un meilleur profil de risque cardio-vasculaire, en agissant sur l'inflammation et la résistance à l'insuline. Le régime méditerranéen réduirait ainsi de 30 % le risque de diabète de type 2 et de 25 % celui de maladie coronarienne chez la femme (1). Il préviendrait du risque de récidive après un infarctus en améliorant la fonction endothéliale des artères, dont les lésions prédisent la survenue d'événements cardio-vasculaires. Moins rigides,

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

DASH Régime visant à réduire l'hypertension artérielle, enrichi en fruits, légumes et céréales sources de fibres. Il limite les aliments riches en sel et en graisses.

MIND Régime alimentaire conçu pour favoriser la santé du cerveau. Il met notamment l'accent sur la consommation de légumes à feuilles vertes (pousses d'épinards, mâche, chou vert) et les baies (myrtilles, mûres, etc.).

ANTIOXYDANTS Composés produits par les végétaux pour se protéger des agressions environnementales. On compte parmi eux les polyphénols, les caroténoïdes, certains minéraux (sélénium, cuivre, zinc, etc.) et vitamines (E et C).

les artères seraient ainsi capables de s'adapter aux situations dans lesquelles un plus grand flux sanguin est nécessaire (2).

Il protège le cerveau

L'aptitude à retenir des informations déclinerait plus lentement chez les personnes qui suivent de manière stricte un régime méditerranéen. Selon les auteurs, certains nutriments comme les acides gras de type oméga-3 (DHA et EPA), présents dans les poissons gras (sardines, hareng, maquereau, etc.), auraient des effets protecteurs sur les neurones (3). Une alimentation méditerranéenne réduirait de 23 % le risque de démence, selon une équipe de nutritionnistes et de neurologues de l'université de Newcastle (Royaume-Uni) qui a suivi 60 298 individus de la UK Biobank durant dix ans (4). Ce régime agirait aussi sur l'humeur et réduirait les symptômes du stress et de l'anxiété, d'après des travaux australiens (5).

Il est anti-inflammatoire

La consommation d'huile d'olive extra-vierge, source d'acide gras mono-insaturés, associée à celle de fruits et de légumes, de céréales complètes et de légumes secs, riches en fibres et en antioxydants (polyphénols, caroténoïdes, flavonoïdes, etc.), induit une croissance accrue d'espèces bactériennes bénéfiques (*Bifidobacterium*, *Bacteroïdes*, *Faecalibacterium prausnitzii*) pour le microbiote intestinal et une moindre croissance d'espèces considérées comme plus néfastes (*Firmicutes* et *Blautia*). De tels changements dans le microbiote intestinal auraient pour effets de réduire l'inflammation et le stress oxydant, lesquels favorisent diverses pathologies chroniques (diabète, maladies cardio-vasculaires, obésité, polyarthrite rhumatoïde, etc.) (6).

Il facilite la perte de masse grasse

Quoique maigrir ne soit pas un objectif visé par le régime méditerranéen, des travaux ont montré qu'il aurait des effets bénéfiques sur la masse grasse abdominale susceptible de favoriser le diabète ou les maladies cardiaques. Des chercheurs espagnols ont constaté, après un an d'adoption du régime méditerranéen, une diminution de 13 % de la masse grasse totale, de 11 % de la masse maigre totale et de 14 % de la masse grasse viscérale par rapport au groupe témoin (7). ■ **Sylvie Boistard**

(1) Primary prevention of cardiovascular disease in women with a Mediterranean diet, Pant A. et al, *BMJ Heart*, 2023.

(2) Mediterranean diet and endothelial function in patients with coronary heart disease, Yubero-Serrano E.M. et al, *Plos Medicine*, 2020.

(3) Association of mediterranean diet with cognitive decline among diverse hispanic or latino adults from the hispanic community health study, Moustafa B. et al, *Jama Network Open*, 2022.

(4) Mediterranean diet adherence is associated with lower dementia risk, independent of genetic predisposition, Shannon O.M. et al, *BMC Medicine*, 2023.

(5) Adherence to a Mediterranean Diet Is Inversely Associated with Anxiety and Stress but Not Depression, Allcock L. et al, *Nutrients*, 2024.

(6) The Effects of the mediterranean diet on health and gut microbial, Barber T.M. et al, *Nutrients*, 2023.

(7) Consumption of Olive Oil and Risk of Total and Cause-Specific Mortality among US Adults, Guasch-Ferre M. et al, *JACC*, 2022.

ALEXANDRA RETION Diététicienne-nutritionniste à Paris*

Un régime plutôt facile à adopter

« On peut facilement suivre ce régime alimentaire en apportant un peu plus chaque jour de végétaux (légumes, légumes secs, céréales, oléagineux) dans son assiette. Un repas type se compose de crudités ou d'une entrée avec des légumineuses et des légumes cuits, d'un plat de poisson accompagné de légumes verts ; des céréales complètes avec une légumineuse ou bien d'un morceau de fromage (brebis ou chèvre) avec du pain complet. La note sucrée est juste apportée par le miel ou les fruits. »

* Auteure de *Régime crétois, les secrets de la longévité*, Éd. Hachette Cuisine.

TUUL ET BRUNO MORANDI / HEMIS.FR

Découvertes par des agriculteurs en 1974 près de la ville de Xi'an, dans le centre de la Chine, les milliers de statues de cavaliers, fantassins, chars, chevaux façonnées à la main ont été enterrées en 210–209 avant notre ère au cœur du mausolée de Qin Shi Huang.

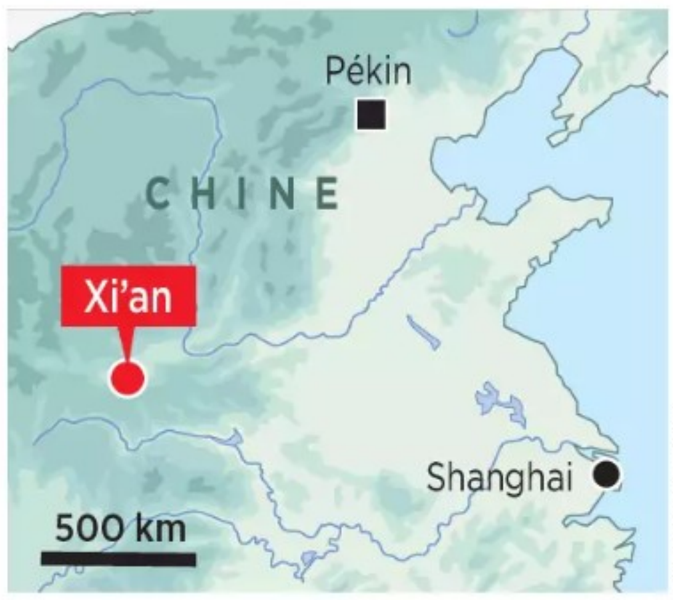
Chine

L'armée de terre cuite n'a pas révélé tous ses secrets

Il y a cinquante ans débutait en Chine centrale l'un des plus vastes chantiers de fouilles au monde. Il allait bientôt mettre au jour des milliers de soldats de terre cuite, sans doute destinés à défendre dans l'au-delà le premier empereur de Chine. De récentes recherches semblent authentifier la chronique historique, soupçonnée d'être légendaire, de cette dynastie fondatrice de l'empire du Milieu.

Par Sylvie Rouat

À une demi-heure de route de la ville de Xi'an, ancienne capitale de la Chine impériale, les vergers défilent sur les côtés. Des bus déversent inlassablement leur cohorte de visiteurs devant l'entrée du site archéologique de l'« armée de terre cuite » et ses milliers de guerriers figés. À environ un kilomètre de là, au cœur du mausolée de Qin Shi Huang (premier empereur de la Chine, 259-210 avant J.-C., *lire l'encadré p. 81*), les archéologues chinois ont extrait un cercueil scellé de 16 tonnes. La tombe qui l'abritait fait partie d'un ensemble de neuf chambres funéraires, localisées au pied de la sépulture de l'empereur. Jusque-là, les autorités chinoises avaient interdit l'accès à ces tombes, préférant les léguer intactes aux générations futures. Mais ces dernières années, des pluies diluviennes ont menacé d'endommager l'un des caveaux, qui a finalement été ouvert. Les chercheurs y ont trouvé des arbalètes, épées, armures et autres pièces en jade et petites figurines — dont un chameau en or —, ainsi qu'environ 6000 pièces de monnaie en ▶



BRUNO BOURGEOIS

ZOU JINGYI / XINHUA / MAXPPP

WANG YUGUO / XINHUA / MAXPPP

Avant d'être restaurés (à gauche), les éléments de statues mis au jour sont analysés au moyen de diverses technologies, telles que les rayons X, ultrasons et acquisition d'images 3D.

bronze. Un trésor digne d'un haut dignitaire. La position de la tombe à proximité du tumulus impérial indique qu'il s'agit d'un proche de Qin Shi Huang. L'analyse de fragments de crâne, d'os du fémur et d'une dent a démontré au début des années 2020 que le squelette est celui d'un jeune homme d'une vingtaine d'années, en bon état de santé. Ce faisceau d'indices semble conduire les archéologues sur la piste du prince Gao, l'un des fils de Qin Shi Huang. Si cette piste se vérifie, cela attesterait l'authenticité des récits rapportés par le *Shiji*, première somme de l'histoire de la Chine. Ses 130 volumes ont été rédigés de 109 à 91 avant J.-C. par l'historien Sima Qian à partir des archives historiques de l'époque, ainsi que des témoignages et traditions orales recueillis au cours de ses nombreux voyages aux quatre coins de l'empire. Il relate notamment, à 200 ans de distance, l'avènement et le court règne de la première dynastie Qin. Cette chronique historique, parfois soupçonnée d'être légendaire, s'est éclairée d'un jour nouveau il y a cinquante ans.

En ce printemps 1974, les terres fertiles de Xianyang subissaient une sécheresse sévère. Les agriculteurs décidèrent d'y remédier en creusant des puits. La houe d'un paysan toucha soudain un objet en terre cuite. Croyant qu'il s'agissait d'une jarre, Yang Zhifa dégagea la terre avec précaution, mettant au jour le corps d'une statue sans tête. Cette découverte, dont la nouvelle parvint bientôt aux oreilles d'archéologues chinois, fut le point de départ d'un vaste chantier de fouilles qui continue aujourd'hui.

Villages et champs agricoles ont peu à peu laissé place à de vastes halls d'exposition, des parkings et des maga-

SHAANXI CULTURAL HERITAGE PROMOTION CENTER

Cette grue tenant un poisson dans son bec, haute de 75 cm, a été découverte en 2000 dans une fosse avec 45 autres oiseaux en bronze.

sins de souvenirs. Un demi-siècle de recherches a permis de localiser à ce jour quelque 600 fosses formant un impressionnant complexe de voûtes souterraines, l'un des plus grands sites funéraires au monde. Seules trois fosses sont aujourd'hui ouvertes au public qui s'écoule en foules denses autour de l'armée de terre cuite, tandis que le travail archéologique s'y poursuit. La première fosse, la plus vaste, offre à voir des milliers de soldats d'infanterie dressés en trois rangées de troupes légèrement armées à l'avant, mais protégées sur les flancs et à l'arrière par une rangée de guerriers lourdement blindés. Des analyses en cours montrent que les troupes de fantassins sont disposées en formations identifiables par leur coupe de cheveux, ces dernières étant associées à l'arme portée. Cette distinction capillaire aurait permis aux généraux d'identifier aisément les forces dont ils disposaient sur le champ de bataille. La seconde fosse, en grande partie inexplorée, abrite l'unité des « forces spéciales » comprenant les divisions d'arbalétriers, de cavalerie et de chars. La troisième fosse, explorée dans les années 1980, héberge le centre de commandement de l'armée composé d'officiers de haut rang.

DYNASTIE

Aux origines de l'empire du Milieu

Né en 259 avant J.-C., le jeune Ying Zheng prend les rênes du pouvoir du royaume de Qin à 21 ans. En près de dix ans, il met fin à des siècles de guerres en conquérant les six royaumes rivaux et en les unifiant sous un seul gouvernement centralisé.
En 221 avant J.-C., il s'autoproclame « Premier Empereur de Chine » — Qin Shi Huang en chinois. Qin, qui se prononce « chine », a donné son nom à l'empire du Milieu. Durant son court règne, il unifie les poids et mesures, la monnaie et les écritures, fait construire un réseau routier et un système de canaux pour relier les régions de l'empire. Autant de mesures qui facilitent le commerce et les communications. Pour protéger le nord de son territoire, il lance la construction de la Grande Muraille. Mais le premier empereur est aussi un despote qui instaure un système juridique sévère pour maintenir l'ordre, commet des actes de tyrannie contre les opposants et les intellectuels confucéens, et des autodafés de livres pour effacer le passé. Alors qu'il a lancé la construction du mausolée, le souverain en quête d'immortalité envoie des émissaires sur les routes et par les mers pour lui rapporter un élixir de longue vie. Las, il meurt de cette quête à l'âge de 49 ans.

AKG IMAGES

Qin Shi Huang (259-210 avant J.-C.), premier empereur de Chine.

Chaque soldat est façonné en taille réelle

À ce jour, plus de 2000 soldats en terre cuite ont été exhumés. Mais les archéologues estiment que les trois fosses abritent environ 8000 statues de soldats et officiers, 130 chars tirés par 520 chevaux et 150 chevaux montés par des cavaliers. Chaque soldat, façonné en taille réelle, est unique, se différenciant par les traits du visage, la coiffure, les vêtements, l'âge ou la corpulence. Les chevaux, sculptés avec un grand réalisme, présentent aussi des particularismes. De nombreuses armes en bronze jonchent les fosses : arcs et arbalètes, épées, lances, haches, etc. Enterrées pendant plus de deux mille ans, elles ont néanmoins gardé leur tranchant, protégées par un revêtement antirouille. Cette armée enfouie sous trois mètres de terre était vraisemblablement destinée à défendre l'empereur dans le monde des morts.
Non loin de là, les chercheurs ont déterré une tout autre statuaire composée de musiciens et acrobates en terre cuite, de grues, canards et cygnes en bronze, sans doute destinés à l'agrément de Qin pour l'éternité. La surface du site archéologique est généralement estimée à 56 km² — par comparaison, la Vallée des Rois en Égypte couvre une surface de 5 km² —, mais il pourrait s'étendre bien au-delà. En son cœur s'élève le tumulus du tombeau impérial, haut de 76 mètres. Selon la légende rapportée par le *Shiji*, il aurait été conçu comme une réplique miniature de l'Univers. Son plafond orné de joyaux reconstituerait la voûte céleste,

Des analyses en cours montrent que les troupes de fantassins sont disposées en formations identifiables par leur coupe de cheveux, ces dernières étant associées à l'arme portée

HEMIS.FR

Réplique d'un des deux chars en bois et bronze peint tirés par quatre chevaux, exhumés en 1980 près du tumulus du tombeau impérial.

tandis qu'au sol, des rivières et mers de Chine feraient miroiter leurs ondes de mercure liquide, un élément alors considéré comme un élixir de vie. Une étude publiée en 2020 par Guangyu Zhao, de l'université normale de Chine du Sud à Guangzhou, a enregistré la teneur en mercure atomique de l'air autour du tumulus. *« Nos mesures, effectuées dans trois endroits différents, indiquent des niveaux élevés de mercure atmosphérique, avec des localisations qui sont en corrélation avec les résultats d'échantillonnages de sol* in situ *précédents,* indique l'auteur de l'étude. *Il est possible que du mercure très volatil s'échappe par des fissures qui se sont développées dans la structure au fil du temps.* »

Les derniers ouvriers auraient été emmurés vivants

Ce seul fait — le mercure est toxique — explique en partie pourquoi ce tombeau demeure inviolé. Le *Shiji* évoque aussi la présence de pièges installés pour tuer les profanateurs, dont des arbalètes automatiques. Les archéologues veulent par ailleurs préserver de la destruction d'éventuels matériaux fragiles — parchemins, soieries, etc. Une protection qui aura manqué aux tombes Ming qui, dans les années 1960 près de Pékin, ont vu leurs précieux contenus gravement endommagés par l'air et la lumière lors de leur ouverture. Or, la tombe de Qin contiendrait, outre des bijoux et objets d'art, des modèles réduits de palais et bâtiments qui composaient la capitale de la Chine de son vivant. Pour que les secrets de ce mystérieux tombeau soient préservés, les derniers ouvriers qui participèrent à y enterrer l'empereur y auraient été emmurés vivants.

Au fil des campagnes de fouilles, le site a livré des bribes de son histoire. Des fosses communes ont révélé leur funeste contenu d'ossements d'artisans, ouvriers et autres prisonniers qui ont perdu leur vie au cours d'un chantier de près de quatre décennies, qui aurait mobilisé quelque 700 000 personnes. À proximité du tombeau de l'empereur ont été retrouvés les restes mutilés de plusieurs femmes mêlés à des perles fines et autres pièces d'or, indices de leur haut rang. Il pourrait s'agir de quelques-unes des 48 concubines de Qin Shi Huang qui auraient été sacrifiées après sa mort, selon le *Shiji*.

Cette chronique nous raconte aussi la conspiration orchestrée à cette même époque par deux hauts fonctionnaires, notamment Zhao Gao, un eunuque influent, pour placer sur le trône Ying Huhai, le plus jeune et malléable des fils de l'empereur. Zhao Gao fit ensuite régner un climat de terreur qui précipita la chute de la dynastie Qin et fit sombrer l'empire dans la guerre civile. Cette période de violences fut le théâtre de l'assassinat des nombreux frères de l'usurpateur. Des squelettes d'hommes exhumés avec des attributs impériaux et des traces de blessures à bout portant pourraient être les dépouilles de ces jeunes princes. Le prince Gao pourrait en faire partie, tout en étant traité avec plus d'égard dans une mort qu'il aurait négociée en vue de reposer auprès de son père. Aujourd'hui, les archéologues estiment qu'ils n'ont achevé qu'un sixième des investigations du site, un ouvrage regardé par les Chinois comme un chantier scientifique multigénérationnel. ■

PRÉSERVATION

Fixer les couleurs des guerriers

ROBERT BURCH/ ALAMY/PHOTO12

L'exposition à l'air libre fait rapidement disparaître les couleurs vives des statues.

Lorsque les guerriers de terre cuite sont exhumés, ils arborent des couleurs vives qui s'écaillent dès leur exposition à l'air libre. En cause, leur mode de préparation destiné à l'ensevelissement éternel. Après cuisson, ils ont en effet été laqués d'une sous-couche de résine extraite du sumac de Chine, sensible aux changements d'humidité. Dans les années 1990, des chimistes allemands de l'université de Munich ont mis au point une solution de polymères synthétiques — le polyéthylène glycol — capable de pénétrer dans les pores de la laque et de lier, à l'instar de l'humidité, la surface polychrome à la terre cuite. Aujourd'hui, les chercheurs usent de la spectrométrie de fluorescence X pour identifier les pigments originaux en vue de reconstituer, à terme, les couleurs et motifs d'origine.

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Les murs d'os des catacombes de Paris se relèvent

Les dépouilles de 3 à 6 millions de Parisiens ont été entreposées sous la capitale aux XVIIIe et XIXe siècles. Cette spectaculaire accumulation d'ossements doit être entretenue par des maçons qui restaurent des murs de fémurs, de tibias et de crânes.

Sous une lumière crue et intense, le nombre d'ossements paraît encore plus vertigineux que dans la pénombre qui règne d'ordinaire dans les lieux. À 20 mètres sous terre, dans la partie finale du parcours ouvert au public des catacombes de Paris, une équipe de maçons s'active à démonter et remonter deux grandes hagues — ces murs de fémurs, de tibias et de crânes — très endommagées par le temps. L'éclairage de chantier est donc de mise. « *Sous cette lumière, cela nous fait encore plus relativiser notre place sur Terre. On n'est pas grand-chose!* », lance Loïc Dollet, maçon spécialisé dans les chantiers de monuments historiques et plus particulièrement dans la technique de la pierre sèche, une pratique de construction ancestrale qui consiste à agencer les pierres sans mortier, ciment ou autre liant. « *Quand on manipule un crâne, on ne peut pas s'empêcher de penser qu'il appartenait à une personne qui a dansé et chanté.* » Avec son collègue Florent Bastaroli, il œuvre depuis plusieurs jours à redonner à cette portion d'ossements de près de dix mètres de long sa forme et sa stabilité originelles. « *J'appréhendais de manipuler des os humains mais pour ma part, au fur et à mesure du travail, j'y ai trouvé une forme d'apaisement* », confie Florent Bastaroli.

Avec leurs centaines de millions d'ossements, dont on estime qu'ils appartenaient à au moins 3 millions de Parisiens défunts (peut-être le double, selon certaines estimations) enterrés entre les Xe et XVIIIe siècles, les catacombes de Paris ont la particularité de susciter des sentiments ambivalents chez quiconque y descend. Facilement perceptibles comme une accumulation macabre d'ossements gommant toute notion d'individualité et d'identité, elles sont pourtant le fruit d'une volonté de ne pas oublier les morts d'une ville contrainte d'évoluer.

Un mouvement hygiéniste à l'origine du vaste ossuaire

« *Un événement fâcheux va précipiter la création des catacombes,* rappelle Isabelle Knafou, l'administratrice des lieux. *En 1780, le gigantesque cimetière des Innocents, situé dans le quartier des Halles, éclate. Plus trivialement, des cadavres en décomposition se répandent*

PALÉODÉMOGRAPHIE

Un long et incertain recensement

Depuis 2023, une équipe menée par Philippe Charlier, anthropologue et directeur du laboratoire Anthropologie, archéologie, biologie (université Paris-Saclay), s'attelle à faire parler les ossements de plusieurs hagues effondrées. Celle-ci a plusieurs objectifs : faire de la « paléodémographie » d'abord, c'est-à-dire déterminer à partir des fémurs le nombre d'individus présents dans les catacombes. Ensuite, en apprendre le plus possible sur l'état de santé des Parisiens d'autrefois, toutes époques confondues. Quelles étaient les maladies les plus courantes selon les époques ? Les plus fatales ? Comment le régime alimentaire ou encore les soins médicaux ont-ils évolué ? Pour répondre à ces questions, il faudra compter plusieurs décennies d'analyses.

LAURENT HAZGUI/DIVERGENCE

Florent Bastaroli (en haut) et Loïc Dollet, les maçons spécialisés chargés de restaurer les murs d'os des catacombes parisiennes du XIVe arrondissement.

dans les caves des habitations et commerces attenants. » Dans un mouvement hygiéniste, la création d'un vaste ossuaire souterrain est ainsi décidée et à partir de 1785, contre l'avis de l'Église, farouchement hostile au projet, le cimetière des Innocents est vidé de ses quelque 2,5 millions d'occupants. Les transferts, qui sont effectués discrètement une fois la nuit tombée pour apaiser les mœurs de la population parisienne, se poursuivent jusqu'en 1814, avec la suppression de cimetières paroissiaux tels que Saint-Eustache, Saint-Nicolas-des-Champs et le couvent des Bernardins. Ils reprendront en 1840 lors des travaux d'urbanisme de Louis-Philippe et durant les chantiers haussmanniens de 1859 à 1860.

Cette deuxième phase de rénovation (la troisième devrait avoir lieu dans le courant de cette année) a concerné les ossements provenant de l'église ou du cloître des capucins Saint-Honoré. Installée rue Saint-Honoré, près de la place Vendôme, au tout début du XVIIe siècle, cette congrégation fut dispersée en 1790 et les bâtiments de son couvent, église comprise, rasés en 1804. Les ossements des religieux enterrés depuis des siècles dans cet ensemble se retrouvèrent ainsi dans les catacombes le 29 mars 1804, comme l'indique aux visiteurs une plaque gravée.

La restauration des murs se fait sans mortier

« *Cette partie-là était vraiment abîmée, avec des vides à certains endroits qui menaçaient l'équilibre de la structure* », explique Isabelle Knafou. « *Nous avons tout simplement transposé la technique de la pierre sèche aux ossements* », détaille Loïc Dollet, qui pointe à un endroit un os légèrement différent des autres. « *Ici, on a par exemple inséré un radius pour rééquilibrer la ligne. On parle vraiment de cales et de rattrapages de niveaux comme en maçonnerie.* »

Au-dessus de certains crânes — qui jouent uniquement un rôle décoratif au sein des hagues —, les experts ont pris le parti de récréer avec des tibias des arcs de décharge, un élément d'architecture dont le but est d'alléger le poids du mur en repoussant les charges sur les côtés. « *Pour que la stabilité et surtout la durabilité du mur soient assurées, on doit faire preuve de créativité,* admet Florent Bastaroli. *D'autant qu'après le démontage, on a compris qu'il manquait un grand nombre d'os pour redonner à l'ouvrage son aspect d'antan.* »

Avec le temps, l'humidité et les déambulations de deux milliers de visiteurs quotidiens, de nombreux trous se sont en effet créés dans les structures, obligeant les maçons à piocher çà et là dans les piles d'ossements conservés en vrac à l'arrière des hagues et qui regroupent toutes les parties des défunts autres que leurs fémurs, tibias et crânes. Des travaux nécessaires pour que les morts du couvent des capucins Saint-Honoré continuent à reposer dans leur familière obscurité. ■

Marine Benoit

Marie Curie et l'étalon radium

Entre 1911 et 1913, la physicienne se lance dans la « course à l'étalon » afin d'offrir une référence pour la mesure de la radioactivité. Une recherche qu'elle mène tambour battant alors qu'elle doit affronter une tourmente médiatique sans précédent.

Par Ivan Kiriow

Le 21 février 1913, Marie Curie déposait au Bureau international des poids et mesures (BIPM) de Sèvres (Hauts-de-Seine) un échantillon de 21,99 milligrammes de chlorure de radium, qui constituait l'étalon de mesure de la radioactivité. Elle voyait ainsi l'aboutissement d'un travail de longue haleine mené, qui plus est, durant trois années particulièrement éprouvantes dans une vie qui n'avait pourtant pas été épargnée par les drames et les difficultés. Veuve depuis l'accident de la circulation qui, en 1906, avait coûté la vie à Pierre Curie, son époux et collaborateur, elle avait entrepris de continuer seule leur rêve de science. Si elle avait partagé avec lui — et avec Henri Becquerel, le découvreur de ce qu'il avait appelé les « rayons uraniques » — le prix Nobel de physique 1903 pour la découverte de la radioactivité, il avait fallu toute la pugnacité de Pierre pour que le nom de son épouse soit associé à la récompense. Encore n'avait-elle remporté qu'un quart du prix, et non un tiers comme l'aurait voulu la logique : le couple Curie avait été primé, pour moitié, comme une seule entité, l'autre moitié revenant tout entière à Henri Becquerel…

L'année 1911, qui devait pourtant se clore par la remise de son second prix Nobel — une première dans l'histoire de cette prestigieuse récompense *(lire l'encadré p. 88)* —, avait commencé sous de bien mauvais augures, avec le rejet le 23 janvier de sa candidature à l'Académie des sciences, au terme d'une campagne durant laquelle ses adversaires avaient déversé leur haine de cette « étrangère » (elle était née Marya Skłodowska, à Varsovie, dans la partie de la Pologne alors annexée par l'Empire russe) et réaffirmé la conviction sexiste qu'une femme n'avait pas sa place dans l'auguste assemblée au sein de l'Institut de France. Mais pour elle, le cauchemar ne faisait que commencer.

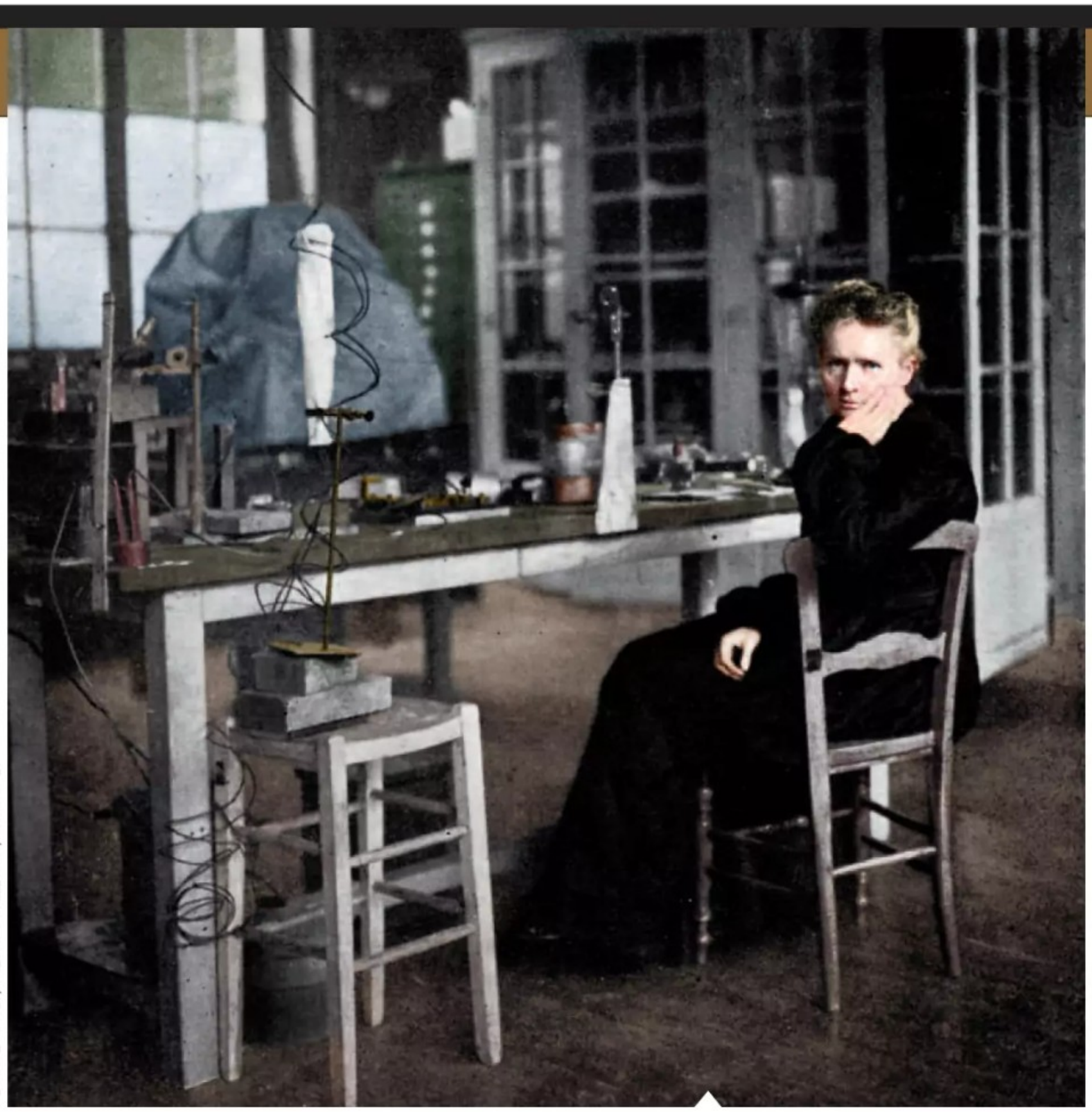
I. KIRIOW

Journaliste scientifique et docteur en histoire des sciences, Ivan Kiriow est l'auteur de « Fascinante Marie Curie », Larousse, 2024.

Une liaison amoureuse qui tourne au scandale

Elle entretenait en effet depuis deux ans une liaison secrète avec Paul Langevin, ancien élève de son mari et éminent physicien, marié mais malheureux en ménage. Découvert par l'épouse trompée, l'adultère avait été étalé dans la presse et les ennemis de Marie, au premier rang desquels les plumitifs antidreyfusards de la presse d'extrême droite, s'en étaient donné à cœur joie pour calomnier et traîner dans la boue la première femme « nobélisée ». L'affaire avait pris des proportions inquiétantes, provoquant plusieurs duels — dont un impliquant Paul Langevin qui ne fit heureusement pas de victime — et poussant une foule enragée à saccager le rez-de-chaussée de la maison où Marie Curie vivait avec ses deux filles et son beau-père.

Le scandale s'envenima lorsqu'elle assista, du 30 octobre au 3 novembre 1911, au premier



HERITAGE-IMAGES / THE PRINT COLLECTOR / AKG IMAGES

Marie Curie (1863-1934), découvreuse du polonium et du radium avec son mari Pierre, dont les travaux sont récompensés par un Nobel en 1903, obtient un deuxième prix Nobel pour avoir isolé le radium et caractérisé ce nouvel élément (ici dans son laboratoire de la rue Cuvier, à Paris, en 1913).

Elle entend bien être la maîtresse d'œuvre, la garante et pour ainsi dire la gardienne de cet étalon du radium

congrès organisé à Bruxelles par le chimiste et industriel belge Ernest Solvay. Paul Langevin faisait certes lui aussi partie des participants, qui représentaient la fine fleur de la physique de l'époque. Mais la presse à scandale, déjà déchaînée contre celle que l'on stigmatisait une nouvelle fois comme une « étrangère » — ayant de surcroît désuni un ménage « français » — présenta le colloque savant comme le prétexte à une nouvelle escapade clandestine des deux amants! L'affaire s'était finalement soldée sans dommage, Marie n'ayant pas été poursuivie comme complice de l'adultère et le couple Langevin s'étant finalement réconcilié. Mais elle l'avait laissée éreintée et plus que jamais désireuse de mener la vie qu'elle avait toujours voulue, consacrée à sa passion pour la recherche, loin du tapage et des affres de la renommée.

Au milieu de la tourmente médiatique et personnelle qu'elle traversait, Marie Curie eut à mener encore un autre combat, mais cette fois sur le terrain qu'elle affectionnait : la recherche scientifique. Et un de ses chevaux de bataille à cette époque fut l'établissement d'un étalon du radium, qui offrirait une référence pour la mesure de la radioactivité.

Lors de sa découverte — en partie fortuite — par Henri Becquerel, la radioactivité était détectée par son effet sur les émulsions photographiques qu'elle impressionnait, l'intensité des taches révélées au développement reflétant celle du rayonnement. Un des apports majeurs des époux Curie à l'étude de ce phénomène avait été de passer de cette approche qualitative et approximative à une mesure quantitative. Ils avaient utilisé une propriété des rayonnements qu'ils étudiaient, celle d'ioniser l'air ambiant — d'arracher des électrons aux molécules (électriquement neutres) en les transformant en ions (électriquement chargés). En mesurant la conductibilité électrique au voisinage des substances radioactives, à l'aide d'un électromètre hautement précis conçu par Pierre avec son frère quelques années auparavant, les Curie étaient parvenus à déterminer indirectement, mais avec une grande précision, l'intensité de ces rayonnements.

C'est cette possibilité de quantifier finement la radioactivité d'un échantillon qui leur avait per-

mis d'isoler le radium, présent en quantités infinitésimales dans les minerais d'uranium où ils avaient décelé sa présence. Mais comme Marie Curie l'écrivit en 1912 dans un article intitulé « Les mesures de radioactivité et l'étalon du radium », *« toutes ces mesures [...] sont rendues absolues quand on dispose pour les comparaisons d'une ampoule étalon contenant une quantité connue de radium. La préparation d'une telle ampoule suppose que l'on a pu peser avec précision une petite quantité d'un sel de radium bien défini. »* Et cet étalon du radium, elle entend bien en être la maîtresse d'œuvre, la garante et pour ainsi dire la gardienne! L'obtention de ses précieux échantillons sera d'ailleurs l'objet d'âpres tractations entre la « reine du radium » et ses confrères qui, dans le monde entier, se sont lancés dans la course à la radioactivité en cherchant à élucider les arcanes de ce phénomène encore bien mystérieux. Ainsi, si elle les dispense de bon cœur au grand Ernest Rutherford, avec qui la concurrence bien réelle n'a jamais empêché des relations cordiales, elle refuse cette faveur à l'Américain Bertram Boltwood (pourtant un proche d'Ernest Rutherford), s'en faisant un ennemi juré — ou à tout le moins un adversaire acharné.

La tension était encore montée d'un cran lors du Congrès international de radiologie et d'électricité de Bruxelles en septembre 1910. Les participants avaient pourtant bien essayé de caresser la farouche physicienne dans le sens du poil en décidant de baptiser « curie » l'unité de mesure de la radioactivité qui devait être établie. Mais cet hommage de pure forme ne suffit pas à lui faire baisser la garde. C'est sur la définition même de ce « curie » qu'elle montra sa détermination, pour ne pas dire son intransigeance.

ADOC-PHOTOS

Première femme à occuper une chaire scientifique en France, Marie Curie a consacré sa vie à promouvoir la science (ici en 1933 lors d'un cours à l'Institut du radium qu'elle a contribué à fonder).

Elle remporte la bataille de l'étalon et de l'unité de la radioactivité

La physicienne obtint finalement gain de cause, mais son absence au gala de clôture de la rencontre, en raison de son état de santé fragile, fut interprétée comme un affront par ses adversaires, au premier rang desquels on retrouvait encore Bertram Boltwood. Ces tensions et ces rivalités n'empêchèrent pas la commission chargée de standardiser les mesures de radioactivité de confier à la physicienne la préparation de l'étalon international.

Marie Curie la combattante avait donc remporté la bataille de l'étalon et de l'unité de radioactivité, mais cette nouvelle victoire ne compta finalement pas parmi ses plus grands titres de gloire scientifique. Adapté pour mesurer des taux de radioactivité assez importants, le curie fut finalement abandonné au profit du… becquerel, unité bien plus commode dans les cas les plus courants. Quant aux méthodes de mesure elles-mêmes, celles employées par Marie Curie allaient être bientôt éclipsées par l'apparition du compteur Geiger, bien plus commode d'utilisation. Mais sa carrière était loin d'être finie, et après avoir mis ses connaissances au service des soins aux blessés pendant la Première Guerre mondiale, elle allait réaliser son grand projet d'un institut du radium, consacré à la fois à la recherche fondamentale et aux applications médicales de la radioactivité. ■

DISTINCTION

La dame aux deux Nobel

Comme pour clouer définitivement le bec à ses détracteurs et autres calomniateurs, l'Académie des sciences de Suède avait défrayé la chronique en remettant en décembre 1911 le prix Nobel de chimie à Marie Curie. Elle était en effet déjà lauréate du prix de physique, remporté en 1903 conjointement avec son époux Pierre. C'était la première fois qu'un scientifique se voyait ainsi décerner deux récompenses — et que cet honneur soit rendu à une scientifique constituait un beau pied de nez à un milieu savant massivement machiste. Mais pourquoi était-elle alors couronnée en chimie ? Et pourquoi l'avait-elle été en physique en 1903, alors que la découverte de deux éléments radioactifs et la purification du second comptaient parmi les réalisations marquantes de son travail sur la radioactivité ? Il faut aussi dire que les frontières entre les deux disciplines étaient devenues floues, principalement à cause du bouleversement que leur avait fait subir la découverte de la radioactivité, qui remettait en cause le principe d'immuabilité des éléments et réactiva le rêve alchimique de la transmutation.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !	plus de 160 000 followers	plus de 163 000 instagrammeurs	Plus de 7 000 abonnés professionnels	plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

TRANSVERSALES

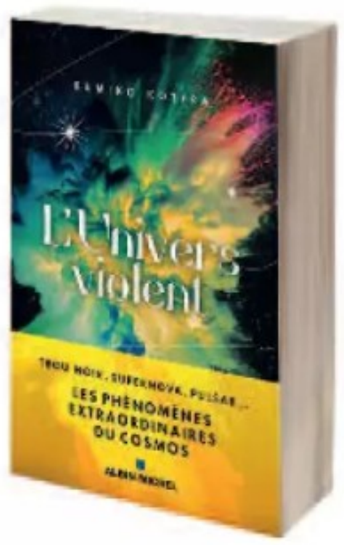
NASA, ESA, CSA, STScI, KLAUSPONTOPPIDAN (STScI)

Le complexe nébuleux de Rho Ophiuchi est la région de formation d'étoiles la plus proche de la Terre.

L'Univers en son et lumière

L'astrophysicienne Kumiko Kotera nous emmène à la découverte des phénomènes les plus violents de l'Univers, grâce à de multiples signaux.

ASTROPHYSIQUE Loin d'être ce monde paisible que l'on peut percevoir à l'œil nu, l'Univers est rempli d'explosions retentissantes, de jets de matière fulgurants, de flashs lumineux ultrapuissants, etc. Mais pas de quoi s'angoisser ! comme nous l'explique ce livre captivant, qui décrypte brillamment le fonctionnement de ces phénomènes et les progrès technologiques qui rendent maintenant possible leur étude « multisensorielle ». Car oui, aujourd'hui nous pouvons non seulement voir, mais aussi entendre la fusion de deux étoiles à neutrons (« *le restant des plus petites étoiles de l'Univers* ») — la première fois, ce fut le 17 août 2017 (« *une longue complainte grave de plus de 30 secondes, se terminant dans les aigus* »). Ou des rayons cosmiques jaillissant à des niveaux d'énergie dix millions de fois plus élevés que ceux que peuvent atteindre les particules accélérées dans l'instrument de science le plus monumental construit par les humains, le Grand Collisionneur de hadrons, en Suisse. Ou encore des explosions d'étoiles géantes en supernovae.



Ce récit mêle par ailleurs, avec beaucoup de verve, histoire personnelle (celle de l'auteure, directrice de l'Institut d'astrophysique de Paris) et histoire des sciences : on y croise des grands pionniers de ce domaine, tels Walter Baade et Fritz Zwicky, qui ont inventé le concept d'étoile à neutrons, ou Karl Schwarzschild, qui a élaboré celui de trou noir et d'horizon des événements (« *l'endroit où tout semble s'arrêter* ») ; on y revient aussi sur les découvertes majeures de ces dernières années : la première photo de trou noir, la première détection d'ondes gravitationnelles, etc. Haletant ! ■ **Vincent Glavieux**

L'Univers violent, Kumiko Kotera, Albin Michel, 304 p., 21,90 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

Far west spatial

PIONNIERS Le journaliste américain Ashlee Vance livre dans cet ouvrage le fruit d'une enquête de cinq années dans les coulisses de quatre compagnies pionnières du spatial privé : Astra, Firefly, Planet Labs et Rocket Lab. Dans le sillage de SpaceX et d'Elon Musk, qui a investi en 2008 un domaine jusque-là réservé aux agences étatiques, une poignée de nouveaux acteurs ont défriché une sorte de far west de l'ingénierie aérospatiale. L'ouvrage brosse leur portrait fascinant, où se mêlent prises de risque, échecs, mensonges, politique, etc. **S. R.**

New space. Génies et marginaux à la conquête de l'espace, Ashlee Vance, Alisio, 608 p., 24,90 €

Hasard et science

BD Cette bande dessinée se penche sur l'histoire méconnue d'avancées scientifiques qui sont pour certaines le fruit du hasard. C'est le cas de l'anesthésie, née dans une attraction de fête foraine aux États-Unis où l'on expérimentait le gaz hilarant. Un homme s'y blessa sévèrement sans ressentir aucune douleur, sous les yeux d'Horace Wells, un dentiste qui testa ensuite le procédé sur lui. Parfois, les découvertes échappent à leurs inventeurs, à l'instar du LSD qui avait vocation à soulager les migraines. Des récits documentés que l'on dévore avec curiosité. **S. R.**

Au petit bonheur la science, Cécily de Villepoix, Casterman, 144 p., 23 €

La préhistoire de nos cerveaux

RECONSTITUTION Au cœur de ce livre, une réussite scientifique *a priori* impossible : reconstituer le cerveau des humains préhistoriques et en déterminer la structure et le fonctionnement. Impossible, car le cerveau, constitué de tissus mous, ne peut pas se fossiliser. Et pourtant ! Techniques d'imagerie pour comparer l'intérieur de boîtes crâniennes, méthodologie pour mettre en œuvre les expériences de neurosciences réalisées, etc. : ce récit vivant décrit les coulisses de ce succès. **V. G.**

Dans la tête de nos ancêtres, Antoine Balzeau, Belin, 256 p., 19 €

De la racine à l'intestin

ENQUÊTE Alors qu'il est jeune agronome, Pierre Weill se lie d'amitié avec Louis et Lucien. Le premier lui fait découvrir une autre agriculture, celle qui conserve les haies et fait alliance avec les vers de terre pour garantir la bonne santé des sols et la défense de ses cultures. Lucien, lui, se désespère de voir ses vaches toujours plus malades, excepté au printemps, lorsqu'elles retournent au pré. L'auteur a alors une intuition : et si les sols et l'alimentation des animaux avaient un impact sur leur santé. Il va bientôt démontrer les différences de composition nutritionnelle entre l'herbe et le maïs, la première apportant plus d'oméga-3 aux propriétés anti-inflammatoires. Pierre Weill a depuis mis en place sept études cliniques et rédigé nombre d'articles scientifiques pour arriver à la conclusion que la santé humaine commence dans les sols et dans les mangeoires des animaux qui nous nourrissent. Écrit comme un parcours de vie, avec ses rencontres et ses obstacles, le texte est ponctué d'intermèdes scientifiques pour nous éclairer sur le concept de « santé unique ». **Sylvie Rouat**

Une seule santé, Pierre Weill, Actes Sud, 263 p., 22 €

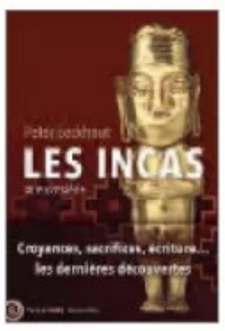
Le chêne, cet inconnu

PORTRAIT Le chêne est un univers à lui tout seul. Le naturaliste Francis Martin fait partie de ces chercheurs qui ont passé leur vie à tenter de comprendre comment vivent les arbres. Spécialiste des relations entre les plantes et les champignons *via* la mycorhize, il ne méconnaît cependant pas les visiteurs ailés, les myriades d'insectes et la vie microbienne qui peuplent et s'insinuent dans et sur l'écorce du plus connu des arbres de France. Partons donc à la découverte du scléroderme vulgaire, du balanin des glands, de la clausilie commune. Le dessin naturaliste de ces espèces par Florian Gadenne est ainsi épaulé par de courts textes savants sur les modes de vie de ces discrets et peu connus habitants du chêne qui s'associent, se dévorent ou s'évitent dans un ballet marqué par les saisons. L'arbre-monde en impose par sa stature et son immobilisme. Mais à l'intérieur de lui, sur ses racines et dans ses branches, la vie grouille et s'agite. **Loïc Chauveau**

L'Arbre-Monde, Francis Martin, Florian Gadenne, Belin, 192 p., 29,90 €

Un nouveau regard sur les Incas

CIVILISATION *« J'en suis venu à connaître nombre de ruines [...] qui témoignent de la grandeur et de l'incroyable complexité du Tawantinsuyu, le nom que les Incas donnaient à leur gigantesque royaume »*, peut-on lire en préambule de cet ouvrage de Peter Eeckhout, spécialiste belge de cette civilisation. Découverte des « momies des glaces » (ces enfants sacrifiés à la cime des montagnes), offrandes extraites du lac Titicaca ou progrès de la datation radiocarbone... L'archéologue fait le point sur les dernières avancées scientifiques. **M. B.**



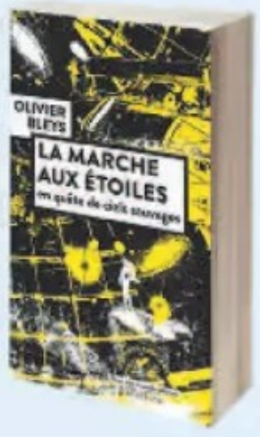
Les Incas, XIIIe-XVIe siècle, Peter Eeckhout, Tallandier, 528 p., 29,50 €

C'EST À LIRE

Des Anglais en Amérique

COLONISATION Dans la première moitié du XVIIe siècle, John Smith, aventurier au service de la couronne britannique, les pèlerins du *Mayflower* ou les puritains de la Compagnie de la baie du Massachusetts ont accepté de coloniser les terres lointaines de la baie de Chesapeake et de la Nouvelle-Angleterre. Mais avec quelles motivations ? L'historienne Agnès Delahaye revient sur les moteurs du peuplement européen de l'Amérique dans un essai critique et passionnant. **M. B.**

Aventuriers, pèlerins, puritains : les mythes fondateurs de l'Amérique, Agnès Delahaye, Passés composés, 272 p., 21 €



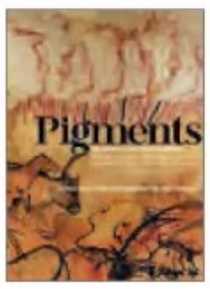
Au plus près des étoiles

AVENTURE Leur projet prit forme lors de longues journées d'enfermement durant la pandémie de Covid-19 : aller contempler les étoiles, là où l'obscurité la plus pure les magnifierait, dans l'Ouest californien, sur les sommets de la Sierra Nevada. Lui irait randonner sur les crêtes sauvages du Pacific Crest Trail, en quête de ciels incontaminés. Elle parcourrait les routes à la découverte des observatoires, à la rencontre des scientifiques et de ceux qui militent contre les pollutions lumineuses en tout genre. Olivier Bleys raconte d'une plume d'explorateur le foisonnant *road trip* entrepris avec sa compagne Julie Philippe, où alternent notations naturalistes, explications de comptage d'étoiles au moyen d'un cylindre en carton, mythologies du firmament, argumentations d'astrophotographes contre la prolifération de satellites et récit d'initiatives pour la création de réserves de ciel noir, rassemblant des communautés entières d'amoureux de la voûte céleste. **Andreina De Bei**

La Marche aux étoiles. En quête de ciels sauvages, Olivier Bleys, Actes Sud, 304 p., 22 €

Une grotte ornée du XXIe siècle

BD Sept dessinateurs, dont Étienne Davodeau, Chloé Cruchaudet et Pascal Rabaté, partent dessiner dans une grotte du Sud-Ouest, armés de lampes torches et des seuls pigments naturels dont leurs lointains ancêtres disposaient voilà 30 000 ans. Dans cette œuvre collective, autant expérience scientifique que défi graphique expriment tout ce dont l'humanité est capable quand elle est aux prises avec les contraintes d'un milieu naturel. Une splendide immersion artistique complétée par une galerie photo des artistes au travail. **H. R.**



Pigments, collectif, Futuropolis, 160 p., 23 €

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 927 ❑ N° 928 ❑ N° 929/930 ❑ N° 931
❑ N° 932 ❑ N° 933 ❑ N° 934 ❑ N° 935

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

N° 927 Univers : la première seconde

N° 928 La France à +4 °C. Ce qui va changer

N° 929/930 20 questions qui obsèdent les scientifiques

N° 931 La molécule miracle

N° 932 L'ordinateur quantique arrive !

N° 933 Prendre le contrôle de ses rêves

N° 934 Voie Lactée. Révélations sur les mystères de notre galaxie

N° 935 Spécial IA. Ce qu'elle change

« **Timmiaruqsimajuq** » (Transformation), de l'artiste inuite Kenojuak Ashevak (2002).

EXPOSITIONS

Auxerre (89)

Légumes dès la racine
Une étonnante collection de légumes en plâtre a été restaurée entre 2020 et 2021. Elle appuie une réflexion sur la diversité végétale, les interactions entre plantes, micro-organismes, animaux, et sur l'histoire de l'agriculture.
Muséum, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 4 mai. Rens. : 03.86.72.96.40.

Bordeaux (33)

Migrations du vivant
Sur deux sites, cette exposition est rythmée par dix questions : pourquoi migrer, vers où, à quel rythme, comment, etc. Le propos concerne la migration des végétaux comme des animaux et des insectes. Lire notre reportage : sciav.fr/936migrations
Muséum de Bordeaux, 5, place Bardineau et Jardin botanique, esplanade Linné, jusqu'au 9 novembre. Rens. : 05.24.57.65.30.

Drancy (93)

3, 2, 1, top… Décollage !
L'histoire des lanceurs spatiaux depuis les années 1950. L'évolution des programmes spatiaux internationaux, d'Ariane à SpaceX en passant par Soyouz, illustre les enjeux stratégiques et commerciaux de l'accès à l'espace.
Château de Ladoucette, parc de Ladoucette, jusqu'au 9 février. Rens. : 01 48 96 50 87.

Londres (Royaume-Uni)

Versailles : science and splendour
Reprise d'une exposition proposée en 2010 au château de Versailles, sur la place des sciences à la cour française. Plus d'une centaine d'œuvres sont présentées, dont le microscope de Louis XV ou la carte de la Lune établie par l'astronome Cassini en 1679.
Science Museum, Exhibition Road, Londres, jusqu'au 21 avril. Rens. : sciav.fr/936versailles

Lyon (69) / Exposition

Le temps d'un rêve

L'humanité s'est toujours questionnée à propos du rêve, perçu tantôt comme mystique ou divin, tantôt comme neurologique ou psychologique. Le musée des Confluences, à Lyon, y consacre une exposition ambitieuse. *« L'enjeu est de proposer une lecture interdisciplinaire du rêve, phénomène peu présent dans la culture occidentale moderne, mais qui conserve une place importante dans de nombreuses cultures traditionnelles »*, explique son chef de projet Yoann Cormier. La déambulation dans l'atmosphère feutrée de ce parcours nous entraîne à la découverte des mystères du monde onirique à travers huit prismes de lecture, présentés chacun dans un espace distinct. Il y est question de rêve lucide décortiqué par les neurosciences, de rite d'incubation dans l'Antiquité, de visions chamaniques dans les cultures traditionnelles, de représentation artistique du rêve à travers l'histoire, du rôle du cauchemar dans la régulation émotionnelle, d'oniromancie, de psychanalyse du rêve, ou encore de récits oniriques. Lire notre reportage : sciav.fr/936reve ■ **Abir Rezgui**

Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 24 août. Rens. : 04.28.38.12.12.

MUSÉE DES CONFLUENCES

Orléans (45)

Odyssée, des récifs aux abysses
La première exposition temporaire du musée est consacrée à l'océan Atlantique. Objets, projections immersives, illustrations, jeux font découvrir les écosystèmes et les problématiques climatiques.
Muséum d'Orléans pour la Biodiversité et l'Environnement, 6, rue Marcel-Proust, jusqu'au 5 octobre. Rens. : 02.38.54.61.05.

Paris (75)

Objets en question. Archéologie, ethnologie, avant-garde
Au milieu des années 1920, des revues d'avant-garde décloisonnent l'art antique et les approches plus scientifiques. Ce mouvement interroge le statut de l'objet, tout à la fois œuvre et trouvaille archéologique.
Musée du Quai-Branly-Jacques-Chirac, 37, quai Branly, du 11 février au 22 juin. Rens. : 01.56.61.70.00.

Feuilleter Notre-Dame, chefs-d'œuvre de la bibliothèque médiévale
Une quarantaine de manuscrits médiévaux provenant de l'ancienne bibliothèque de Notre-Dame de Paris sont présentés, certains pour la première fois. Ils témoignent de la richesse de la vie intellectuelle et artistique de la cathédrale au Moyen Âge.
Musée de Cluny - Musée national du Moyen Âge, 28, rue du Sommerard, jusqu'au 16 mars. Rens. : 01.53.73.78.00.

La grande expédition. Tara, l'art et la science
Une rétrospective couvrant deux décennies d'artistes embarqués à bord de la goélette *Tara* consacrée à la recherche scientifique. Elle met en valeur l'écosystème océan, mais aussi des témoignages et des carnets de voyage.
Centquatre-Paris, 5, rue Curial, jusqu'au 2 mars. Rens. : 01.53.35.50.00.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Le changement climatique intégré dans les comptes de la nation

L'Insee produit chaque année les comptes de la nation dans un format dont le périmètre est resté quasiment inchangé depuis les années 1960. Ils visent à fournir une image quantifiée de l'activité économique du pays à travers un ensemble de grands indicateurs agrégés, tels le PIB, la consommation des ménages et l'épargne. Ces comptes nationaux étaient jusqu'ici aveugles aux enjeux climatiques. En effet, les indicateurs de production, de revenu et d'épargne ne comptabilisaient pas le fait que les émissions de gaz à effet de serre (GES) induites par certaines activités économiques réduisent le patrimoine transmis aux générations futures. Pourtant, ces émissions causent bien des coûts futurs : adaptation à des extrêmes climatiques plus intenses et plus fréquents, effets négatifs sur la santé humaine et celle des écosystèmes, pertes de productivité, de rendements agricoles… Dans sa version 2024, l'Insee intègre pour la première fois les comptes d'émissions de GES, et propose de nouveaux indicateurs agrégés telle l'épargne nette « ajustée ». L'épargne nette nationale est définie comme la différence entre le revenu national et l'ensemble des consommations nationales ; elle s'élevait à 68 milliards d'euros en 2023. L'ajustement prenant en compte les effets des GES conduit à déduire 201 milliards d'euros de cette estimation, établissant l'épargne nette « ajustée » à -133 milliards. Ce chiffre négatif veut tout simplement dire que l'activité économique de la nation n'est pas durable, et annonce un appauvrissement futur, si un changement d'ambition pour la décarbonation de nos activités n'est pas acté immédiatement. ■

Professeure à l'université Claude-Bernard Lyon 1. Dernier ouvrage publié : *Le Rulpidon sous toutes ses coutures*, Dunod, 2024.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

Géométrie et couture : l'élégance des formes

À moins de maîtriser l'art du drapé, par exemple celui du sari, fabriquer un vêtement revient généralement à assembler en les cousant des pièces coupées à plat dans un tissu. Concevoir le patron de ces pièces vise à obtenir un vêtement adapté aux formes et à la corpulence de la personne à habiller. C'est un art mêlant sens de l'esthétique et vision dans l'espace. Cet art fascinait le mathématicien américain William Thurston (1946-2012) au point de l'amener à une collaboration avec le couturier japonais Dai Fujiwara. Ce dernier avait été intrigué par la conjecture de géométrisation de Thurston qui venait d'être démontrée en toute généralité par le mathématicien russe Grigori Perelman. C'est ainsi qu'une collection de la maison du couturier japonais Issey Miyake (1938-2022) fut fortement inspirée par les « huit géométries de Thurston » des espaces tridimensionnels, comme expliqué par la mathématicienne américaine Kelly Delp dans la revue *Math Horizons* en 2012. Elle-même eut une collaboration avec William Thurston qui aboutit à d'étranges patrons, pour habiller non pas une personne mais une sphère ! Les pièces ont comme des doigts et elles rappellent, une fois assemblées, des mains posées sur un ventre arrondi avec les doigts intriqués les uns dans les autres. Vous pouvez vous en faire une idée, si vous avez des gants cousus, en observant comment ils sont faits. La couture avec un regard de géomètre est décidément fascinante. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Rendre à Tesla ce qui appartient à Tesla

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

J'ai assisté, en décembre dernier, au sommet du Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle (PMIA) à Belgrade, dans le palais de Serbie, un immeuble imposant, ancien siège du gouvernement de la fédération de Yougoslavie. Devant la grande salle de conférences, trônait la statue de Nikola Tesla. Lorsque je le fis remarquer à un collègue japonais travaillant en Californie, il me répondit qu'il ne reconnaissait pas Elon Musk… Je me crus obligé de lui rappeler que Nikola Tesla avait été un ingénieur de génie né de parents serbes orthodoxes, à Smiljan, en 1856, au sein de ce qui était à l'époque l'Empire austro-hongrois et qui se trouve aujourd'hui en Croatie. Après des études de mathématiques et de physique à l'université technique de Graz en Autriche, il voyagea dans toute l'Europe, à Prague, à Budapest, puis à Strasbourg et à Paris, avant de se fixer aux États-Unis, à partir de 1884. Il est à l'origine d'une grande multitude d'inventions qui ont révolutionné l'utilisation pratique de l'électricité. Lorsqu'il commença à exercer son métier d'ingénieur chez Westinghouse, on s'intéressait surtout à l'utilisation du courant continu. Très tôt, il pressentit les possibilités offertes par le courant alternatif. Ainsi conçut-il le moteur électrique à induction en recourant à un champ magnétique tournant. Il étudia ensuite les télécommunications par ondes électromagnétiques, sans fil. Il est à l'origine d'une myriade de découvertes prodigieuses. C'est en son honneur qu'on nomma l'unité de mesure des champs magnétiques le tesla ; c'est en hommage à son talent que la société de voitures électriques détenue par Elon Musk porte son nom. En dépit de cette reconnaissance posthume, il a été tout au long de sa vie en butte à de nombreuses difficultés pour faire comprendre l'intérêt de ses découvertes et il mourut en 1943, à l'âge de 86 ans, dans un grand dénuement, alors que ses travaux avaient conduit à de très nombreux brevets massivement utilisés de par le monde. Pour lui rendre justice, rappelons ici que ce n'est pas une marque de voitures, fussent-elles électriques ! ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

Géochimiste de renom, Claude Allègre a marqué les esprits par sa volonté de *« dégraisser le mammouth »* lorsqu'il fut ministre de l'Éducation nationale (1997-2000). Bardé de reconnaissances (médaille d'or du CNRS, prix Crafoord en 1986), ce personnage controversé fut aussi la figure de proue du climatosceptiscisme en France, niant les conclusions scientifiques des spécialistes du climat du Giec. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

NEUROSCIENCES

Pourquoi bâiller est-il contagieux ?

Bris K.

Quand une personne bâille, difficile de ne pas l'imiter. Ce phénomène appelé « échokinésie du bâillement » illustre un curieux mécanisme neuronal. En cause : les neurones miroirs, ces cellules cérébrales activées lorsque nous observons une action réalisée par autrui. Essentielles à l'apprentissage par imitation et à l'empathie, elles permettent de « se mettre à la place de l'autre ». Dans le cas du bâillement, cette activation déclenche une réponse motrice, une rareté en neurologie. Une explication évolutive pourrait éclairer ce mystère : chez nos ancêtres, ce réflexe collectif aurait renforcé la vigilance du groupe face au danger. ■ **Hugo Jalinière**

ZOOLOGIE

Combien de cerveaux possède un poulpe ?

Axel G.

Aussi appelés pieuvres, les poulpes possèdent neuf cerveaux ! Leur structure cérébrale combine un cerveau central dans le corps principal et huit mini-cerveaux dans les tentacules. Ceux-ci, capables d'agir indépendamment, leur permettent de goûter, toucher et se mouvoir de manière autonome, tout en restant sous contrôle du cerveau central. Avec 500 millions de neurones (soit autant que dans le cerveau d'un chien), ces mollusques font preuve d'ingéniosité, aussi bien dans leur milieu naturel (ils protègent l'entrée de leur abri avec des pierres ou des coquillages) qu'en laboratoire (ils savent éteindre des lumières et même reconnaître certains humains). Les poulpes incarnent ainsi une intelligence rare chez les invertébrés. ■ **Anne-Sophie Tassart**

SPL/SUCRÉ SALÉ

La vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil empêche notre planète de s'écraser sur lui.

PLANÉTOLOGIE

Est-ce que la planète Terre tombe ?

Sebastien L.

Oui, en quelque sorte. La Terre est en « chute libre » permanente, et ce depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années. Cela peut sembler étonnant car nous ne ressentons pas cette chute. Mais c'est précisément la nature de l'orbite de notre planète autour du Soleil qui s'apparente à une chute perpétuelle. Pour comprendre cela, il faut envisager la gravité comme une force qui attire les objets vers un centre de masse. Dans le cas de la Terre, le Soleil exerce cette attraction. Si la Terre était immobile par rapport au Soleil, elle serait irrémédiablement attirée et « tomberait » vers lui. Cependant, la Terre se déplace à une vitesse d'environ 108 000 km/h sur une trajectoire presque circulaire. Cette vitesse latérale empêche la planète de s'écraser sur le Soleil. Elle est constamment attirée vers le centre, mais son mouvement est tel qu'elle « tombe » autour du Soleil, ce qui génère une orbite stable. Ce phénomène peut être compris à travers la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui décrit la gravité comme une courbure de l'espace-temps provoquée par des masses telle celle du Soleil. Ainsi, la Terre suit une trajectoire courbée dans cet espace-temps, comme une bille qui roulerait sur la paroi d'un entonnoir. Cette trajectoire est la définition même d'une chute libre : la Terre ne ressent aucune force extérieure (comme un astronaute en apesanteur dans une station spatiale). Nous ne remarquons donc pas cette chute, car nous y participons pleinement, et c'est le référentiel même de notre existence. ■ **Lise Loumé**

LE CIEL DE FÉVRIER

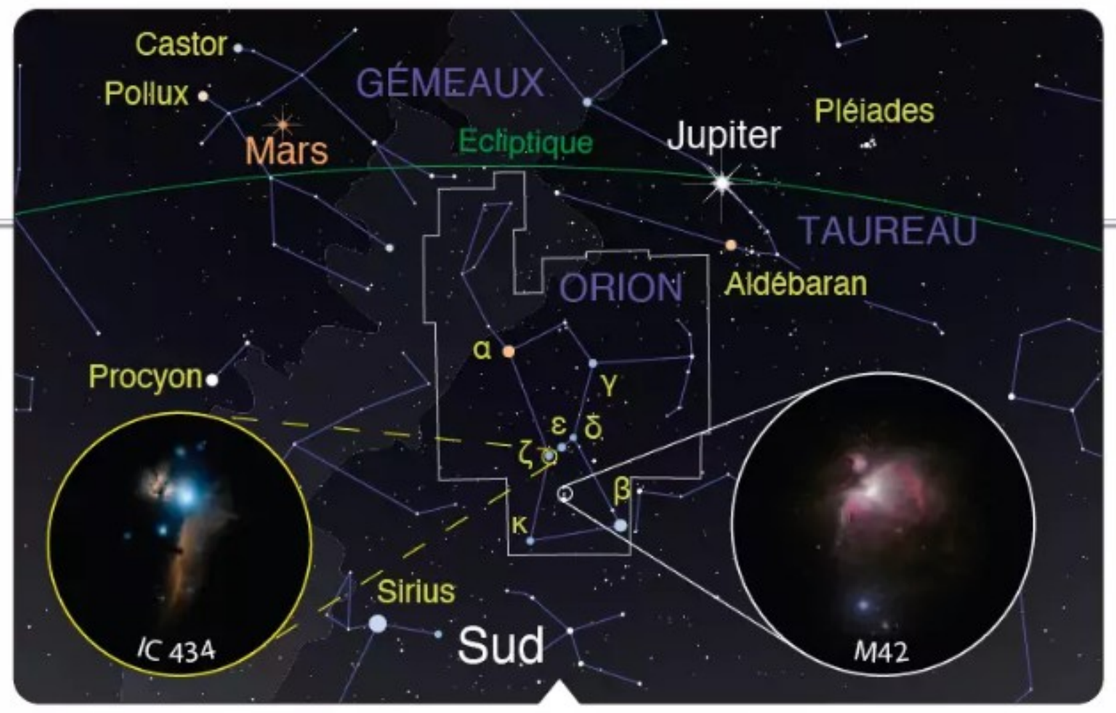
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète passe en conjonction supérieure le 9. Elle s'éloigne ensuite progressivement de la direction du Soleil jusqu'à devenir observable en soirée en fin de mois, bas vers le couchant.

VÉNUS L'étoile du Berger se trouve encore dans d'excellentes conditions d'observation et brille intensément vers l'ouest en soirée. Elle se couche 4 heures après l'astre du jour le 1er et près de 3 heures après lui le 28.

MARS La planète Rouge est visible dès la tombée de l'obscurité et une grande partie de la nuit dans les Gémeaux. On la trouve très haut dans le ciel en seconde partie de soirée. Sa distance à la Terre augmentant au cours du mois, son éclat diminue de moitié durant la même période.



Par ordre d'éclat décroissant, les sept étoiles les plus brillantes d'Orion sont β (Rigel), α (Bételgeuse), γ (Bellatrix), ε (Alnilam), ζ (Alnitak), κ (Saiph) et δ (Mintaka).

Orion, majesté hivernale

Située au cœur du ciel d'hiver, Orion est un rectangle au centre duquel trônent trois étoiles brillantes qui forment la ceinture d'Orion. Cette constellation héberge plusieurs nuages de gaz et de poussières, dont la célèbre nébuleuse d'Orion (M42) et IC 434, hôte de la non moins célèbre nébuleuse de la Tête de cheval.

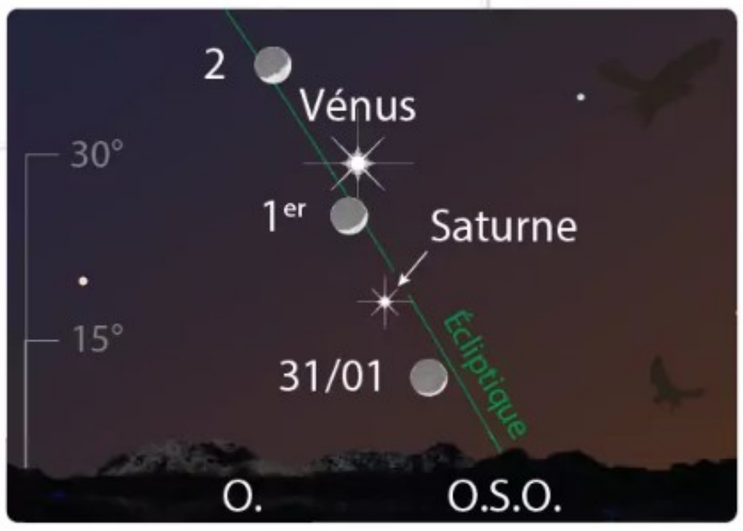
Notre conseil Facile à identifier, Orion domine majestueusement l'horizon sud vers 21 heures. On peut détecter aux jumelles M42 sous la forme d'une nébulosité grisâtre, mais la nébuleuse IC 434 n'est accessible qu'avec un télescope.

JUPITER La plus grosse des planètes culmine peu après le coucher du Soleil dans le Taureau. Aucun doute n'est permis : si, le soir, vous voyez un point très brillant haut dans le ciel, il s'agit de Jupiter !

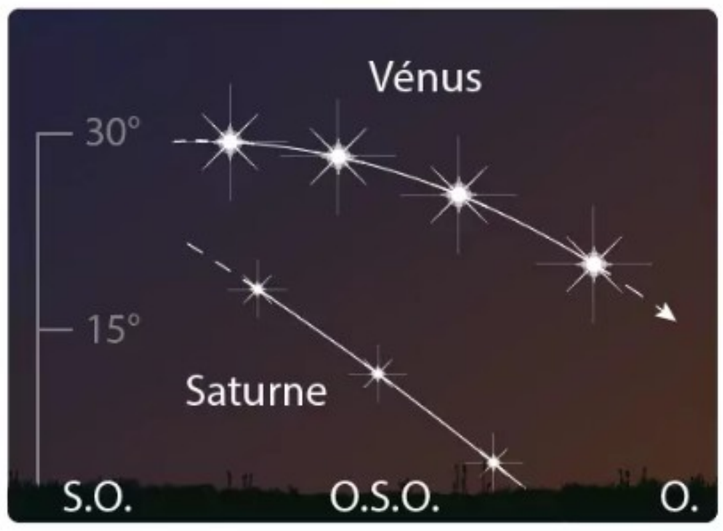
SATURNE La planète aux anneaux est petit à petit rattrapée par le Soleil et voit donc les lueurs du crépuscule fondre sur elle. Elle est observable le soir pendant deux à trois semaines avant d'être engloutie par l'éclat de notre étoile. Nous ne la retrouverons qu'en mai, au petit matin.

L'appli du mois

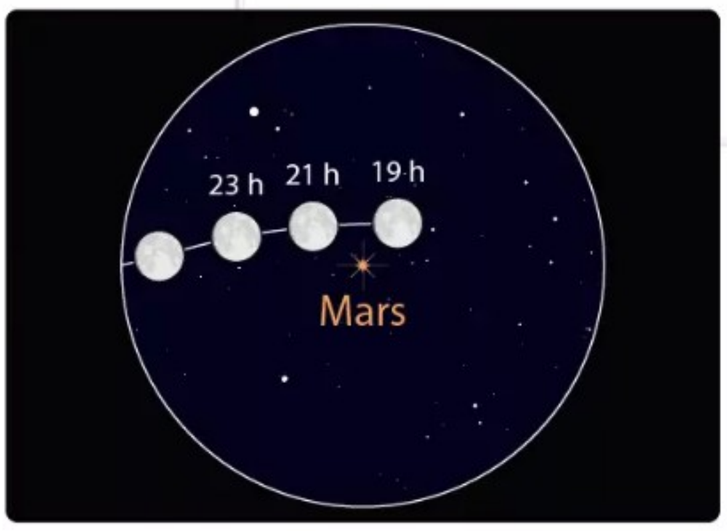
STELLARIUM CARTE DU CIEL est une application gratuite en français pour Android et iOS. Dotée d'un environnement photoréaliste, elle permet d'explorer le firmament en temps réel et d'apprendre le nom et la localisation des étoiles, constellations et planètes en pointant son téléphone vers le ciel.



EN DÉBUT DE MOIS, 1 HEURE APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, observez le premier croissant de Lune monter doucement soir après soir à la rencontre des planètes Saturne et Vénus.



AU FIL DU MOIS, LES PLANÈTES VÉNUS ET SATURNE cheminent lentement vers l'horizon. Voici leur position les 1er, 10, 19 et 28 (pour Vénus), une heure après le coucher du Soleil.



LE SOIR DU 9, LA LUNE EN PHASE GIBBEUSE CROISSANTE passe très près de Mars. Ce rapprochement permet de mettre en évidence le mouvement propre de notre satellite.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de février

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▸ Trajet numérique

Saurez-vous joindre ces dix nombres en partant de 21, sans passer deux fois par le même et sans qu'aucun n'ait de diviseur commun avec le suivant ?

▸ Logique de nom

Voulez-vous connaître mon nom ?

Rien de plus simple : c'est un mot courant de la langue française en quatre lettres.

Je peux vous révéler que TRIE, TARI, et TAON contiennent chacun deux lettres de mon nom, mais pas à la bonne place.

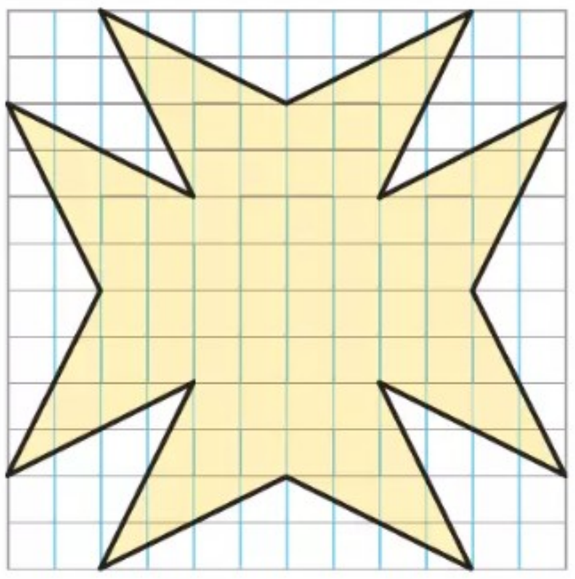
En revanche, vous devez savoir que TEST ne contient aucune lettre de mon nom.

Saurez-vous maintenant deviner quel est mon nom ?

▸ De Malte à Pythagore

Curieusement, cette croix de Malte déformée peut être découpée en 5 morceaux permettant de reconstituer un contour carré.

Saurez-vous le réaliser ?



▸ Multiplication trouée

Non ! Ne prenez pas votre calculette et ne réalisez pas cette multiplication pour afficher le chiffre manquant ! Atteignez-le directement.

```
  2 3 2 2 4 3 2
×           2 8 8
-----------------
6 6 8 ? 6 0 4 1 6
```

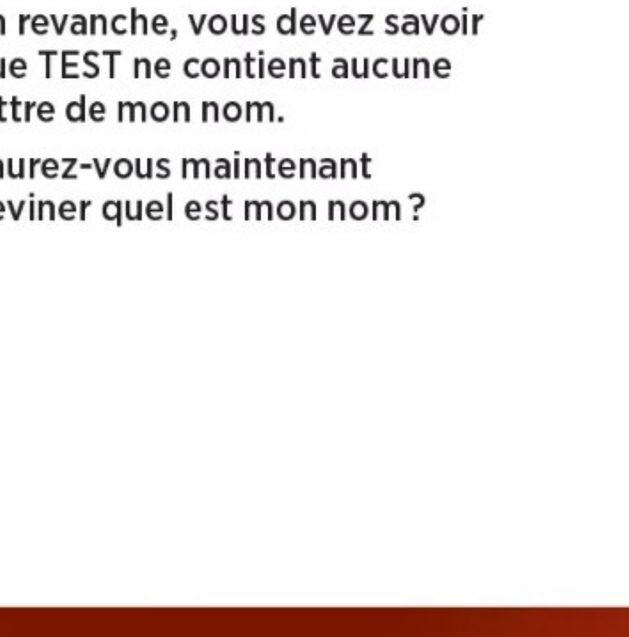
▸ Printemps alphabétique

Dans cette opération, chaque lettre représente un chiffre.

```
  L U N D I
+ M A R D I
-----------
  A V R I L
```

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 935, janvier 2025

▸ Sudoku spatial



▸ Désordre logique

La conversation devient plate à proportion que ceux avec qui on la tient sont plus élevés en dignité. (La phrase est écrite à l'envers.)

▸ À pas comptés

Cherchons d'abord le nombre de personnes non déguisées. On en trouve 8 dans la petite pièce, donc 12 (1,5 x 8) dans la pièce moyenne et (2,5 x 8) x 2, soit 40 dans la grande. Cela fait un total de 8 + 12 + 40 = 60. Elles représentent 20 % des invités, ce qui donne un total de 300 invités (5 x 60).

▸ Logique calendaire

Dimanche : seul jour ne se terminant pas en di. - **Jeudi** : seul jour avec 2 voyelles qui se suivent. - **Jeudi** : seul jour avec seulement 2 consonnes.
- **Mercredi** : seul jour avec 2 R.
- **Samedi** : seul jour en 6 lettres.
- Lettre unique : L pour **lundi**, J pour **jeudi**, H dans **dimanche**.

▸ Quel prix manque ?

Café mûr = 1 (longueur du premier mot moins longueur du second).

LABORATOIRES
ILAPHARM
www.ilapharm.com

A vos côtés, pour votre santé !

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

OFFRE Découverte
Dès **5€**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Code privilège : **CS455**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(1)*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (7), (9)*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel. Idéal avec le Safran BIO !**

7€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences**. *(10)*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

7€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**.
*Allergène : **poisson**. (4), (6)*

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(5), (11)*

6€ 30 gélules

Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile**. **Idéal avec la Maca BIO !** *(2)*

7€ 20 gélules

Un esprit vif
GINKGO BILOBA BIO

Arbre de jouvence, il favorise votre circulation cérébrale pour un **esprit vif et alerte**. *(2), (5), (13), (14)*

5€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**. *(7) (16)*

6€ 10 ampoules ~~15,60€~~

Défenses naturelles
ÉCHINACÉA BIO

Aide au **bon fonctionnement du système de défenses naturelles** et **respiratoire** (bouche et gorge). *(16), (17)*

6€ 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !** *(9), (12)*

5€ 45 gélules

Capital-vision
MYRTILLE MYROBALAN BIO

Préservez votre vision au quotidien (bonne clarté visuelle) ! *(15)*

7€ 10 ampoules ~~17,90€~~

VOS 3 CADEAUX

Le Plaid "Vert Sauge"
OFFERT

100% Polyester - 180 gsm
Dimensions 100x150 cm

Les Frais de Port Dès 15€ d'achat **0€** *Au lieu de ~~6,50€~~*

dès **5€** **Tous vos produits** EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5€
Charbon & Fenouil BIO	6€
Huile de Courge BIO	7€
Safran BIO	7€
Maca BIO	7€
Plaid "Vert Sauge"	**OFFERT**
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**32€**

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (2) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (3) Contient de la caféine (50 mg par jour). (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Ne pas associer avec des anticoagulants. (6) Possible effet laxatif. (7) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (8) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (9) Déconseillé en cas de troubles cardiaques (contient de la caféine). (10) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (11) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (12) Déconseillé en cas d'insuffisance rénale œdémateuse. (13) Déconseillé aux personnes épileptiques. (14) Déconseillé en cas d'opération chirurgicale. (15) En cas de troubles digestifs, consultez votre médecin avant consommation. (16) Ne pas consommer en cas d'allergie aux plantes de la famille des Asteraceae ainsi qu'en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (17) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

NOS GARANTIES

PAYEZ DANS 1 MOIS
*Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

POUR COMMANDER

C'EST FACILE
sur notre site internet :
www.ilapharm.com

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

ILAPHARM chez DIMOLOG
ZA de la Touche Tizon
8, rue René Panhard
35230 NOYAL-CHÂTILLON-SUR-SEICHE

COMMANDE "OFFRE DÉCOUVERTE" - SANS ENGAGEMENT

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail* : .....
pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**
** Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N°|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_|_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|
Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		7€	
Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		5€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Echinacéa BIO	PECB45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB		7€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **PLAID "Vert Sauge"** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				**OFFERTS**
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
Code privilège : **CS455**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/ conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

Pour vous, une affaire en Or
c'est forcément de l'argent en plus.

Grande Panda
La Boîte à Malices.

100 % ÉLECTRIQUE, DÈS 18 900 €(1)

FIAT

(1) Pour la commande d'une **Nouvelle Fiat Grande Panda (RED)** 44kWh neuve sans option au tarif conseillé en vigueur au 04/10/2024, **déduction faite du bonus écologique de 4 000 € selon les conditions du décret n°2024-1084 du 29 novembre 2024 (conditions d'éligibilité sur https://www.economie.gouv.fr) et incluant 2 000 € d'aide à la reprise €cobonus Fiat sous condition de reprise d'une voiture de plus de 10 ans.** Offre non cumulable avec d'autres offres en cours, réservée aux particuliers et **valable jusqu'au 28/02/2025** dans le réseau Fiat participant. RCS Versailles 305 493 173. **Modèle présenté :** Nouvelle Fiat Grande Panda La Prima 44kWh (**21 900 €** dans les mêmes conditions). **Gamme Nouvelle Fiat Grande Panda : Consommations min/max (Wh/km) : de 174 à 174 ; Émissions de CO_2 (g/km) : 0 à l'usage. Jusqu'à 320 km d'autonomie électrique en WLTP.**

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo #SeDéplacerMoinsPolluer